



Sokerijuurikkaan tuotantofunktio ja taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso

Juha Mäenpää
Helsingin yliopisto
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta
Maatalous-, ympäristö- ja
luonnonvaraekonomian maisteriohjelma
Maatalousekonomia
Marraskuu 2021



Tiedekunta – Fakultet – Faculty Maatalous- ja metsätieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Maatalous-, ympäristö- ja luonnonvaraekonomian maisteriohjelma	
Tekijä – Författare – Author Juha Mäenpää			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Sokerijuurikkaan tuotantofunktio ja taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Maatalousekonomia			
Työn laji – Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika – Datum – Month and year 11/2021	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 55+15
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, mikä tuotantofunktio muoto parhaiten kuvaisi typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan juurisatoon, ja arvioida, mikä vaikutus typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteella on taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon sokerijuurikkaalla. Lisäksi tavoitteen oli tutkia, mikä vaikutus sokerijuurikkaan sokeripitoisuuden huomioon ottamisella on taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon ja sokerijuurikkaan katetuottoon.</p> <p>Tutkimuksen teoriaosassa tarkastellaan ensisijaisesti sokerijuurikkaan viljelyä Suomessa, viljelyn edellytyksiä sekä sokerijuurikkaan lannoitusta. Teoriaosassa käydään läpi myös klassisen tuotantofunktion määritelmä ja siihen liittyviä oletuksia. Lisäksi tarkastellaan aiempia tutkimuksia, jotka liittyvät eri tuotantofunktio mallien käyttöön vertailtaessa typpilannoituksen vaikutusta satovasteeseen. Teoriaosassa käydään läpi myös taloudellisen optimin määrittäminen.</p> <p>Tutkielman aineistona on Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskuksen vuosina 2013–2020 suorittamien typpiporraskokeiden tulokset. Typpilannoituskokeet oli suoritettu viiden kerranteina ja testituloksia oli yhteensä 830 kappaletta. Tutkimusmenetelmänä käytetään regresioanalyysiä ja vertailtavina funktio muotoina kvadraatti-, neliöjuuri- ja Mitscherlich-funktiota, lineaarista funktiota tasanteella (LRP-malli) sekä kvadraattista funktiota tasanteella (QRP-malli).</p> <p>Tutkimuksen tulosten perusteella sokerijuurikkaan typpilannoituksen satovastetta kuvasi parhaiten BIC-testisuureen ja selitystasasteen perusteella LRP-mallin paikka- ja vuosi-dummy-muuttujalla perustuva malli, mutta ero kvadraattifunktioon ja Mitscherlich-funktioon vastaavilla dummy-muuttujilla oli hyvin pieni. Neliöjuurifunktioon perustuvissa malleissa osa mallin antamista lannoitussuosituksista olivat epärealistisen korkeita ja siten epäluotettavia.</p> <p>Taloudellisesti optimaalista lannoitustaso vertailtiin vuosien 2006, 2010, 2014 ja 2019 typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteilla. Vertailuvuosista vuoden 2006 sisällä eri funktio muotojen välillä erot olivat suurimmat, muina vuosina eri funktio muotojen välisen erot eivät olleet suuret. LRP-mallissa on vain kaksi suositeltavaa lannoitustasoa. Nämä ovat 0 kg/ha tai eri LRP-muodoille tässä estimoidut lannoitustasot. Mikäli LRP-mallissa rajakustannus olisi rajatuottoa isompi, typpilannoitusta ei kannattaisi tehdä. Tarkastelu vuosien typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteilla, lannoitus oli kannattavaa jokaisena tarkasteluvuotena.</p> <p>Tutkimuksessa selvitettiin myös, mikä vaikutus sokerijuurikkaan sokeripitoisuudella on taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon. Tulosten perusteella sokeripitoisuuden huomioon ottaminen alensi optimaalisia lannoitustasoja ja sadosta saatava katetuotto kasvoi.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords typpilannoitus, sokerijuurikas, tuotantofunktio, regressioanalyysi			
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Professori Timo Sipiläinen, Helsingin yliopisto			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopisto			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

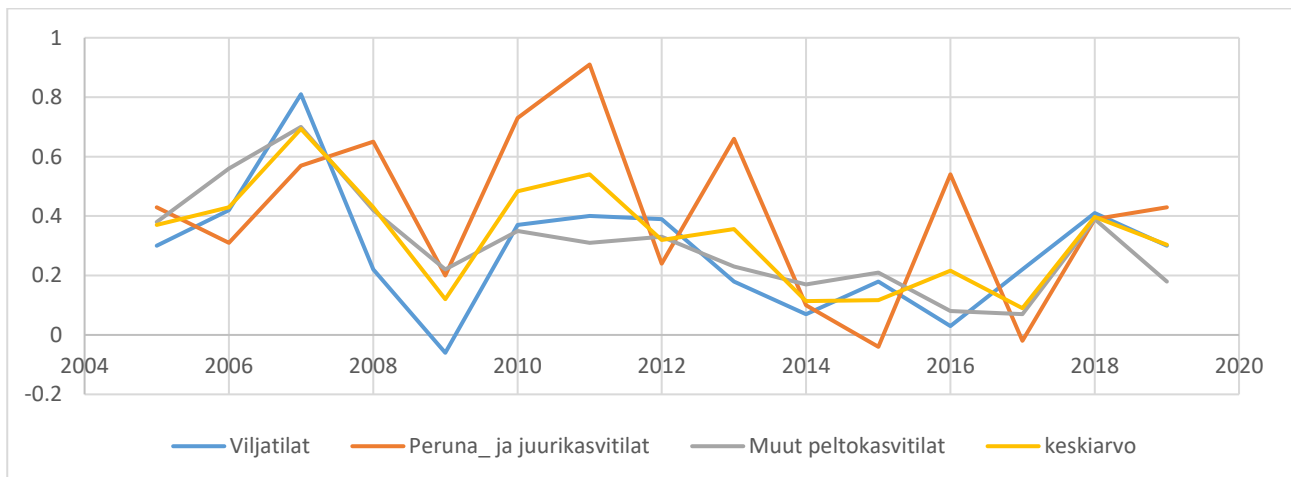
Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	4
1.1	Tutkimuksen tausta.....	4
1.2	Tutkimuksen tavoite.....	5
2	Tutkimuksen teoreettinen tausta.....	6
2.1	Sokerijuurikkaan viljely Suomessa	6
2.2	Sokerijuurikkaan viljelyn edellytykset ja tekniikka	6
2.3	Sokerijuurikkaan typpilannoitus	10
2.4	Tuotantofunktio	12
2.5	Taloudellisen optimin määrittäminen.....	15
3	Aineisto ja menetelmät	19
3.1	Sokerijuurikkaan tutkimuskeskuksen typpilannoituskoeaineisto.....	19
3.2	Tutkimusmenetelmät	20
4	Tulokset	25
4.1	Tuotantofunktioiden estimointi ja vertailu	25
4.2	Taloudellisen optimin määrittäminen.....	30
4.3	Sokeripitoisuuslisän vaikutus taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon	38
5	Tulosten tarkastelu.....	44
6	Johtopäätökset.....	49
	Lähteet.....	50
	Liite 1. Typpiporraskoe aineistosta tehtyjen estimointien tulokset.....	56
	Liite 2. Estimointien tulokset dummy-muuttujilla.....	59
	Liite 3. Estimoitujen mallien residuaalien histogrammit ja niiden suhde normaalijakautumaan.	64
	Liite 4. Estimoidut mallit typpilannoituksen vaikutuksesta sokeripitoisuuteen.	68
	Liite 5. Estimoidut mallit typpilannoituksen vaikutuksesta sokeripitoisuuteen, kun mukana on vuosi- ja paikka-dummy-muuttujat.	69

1 Johdanto

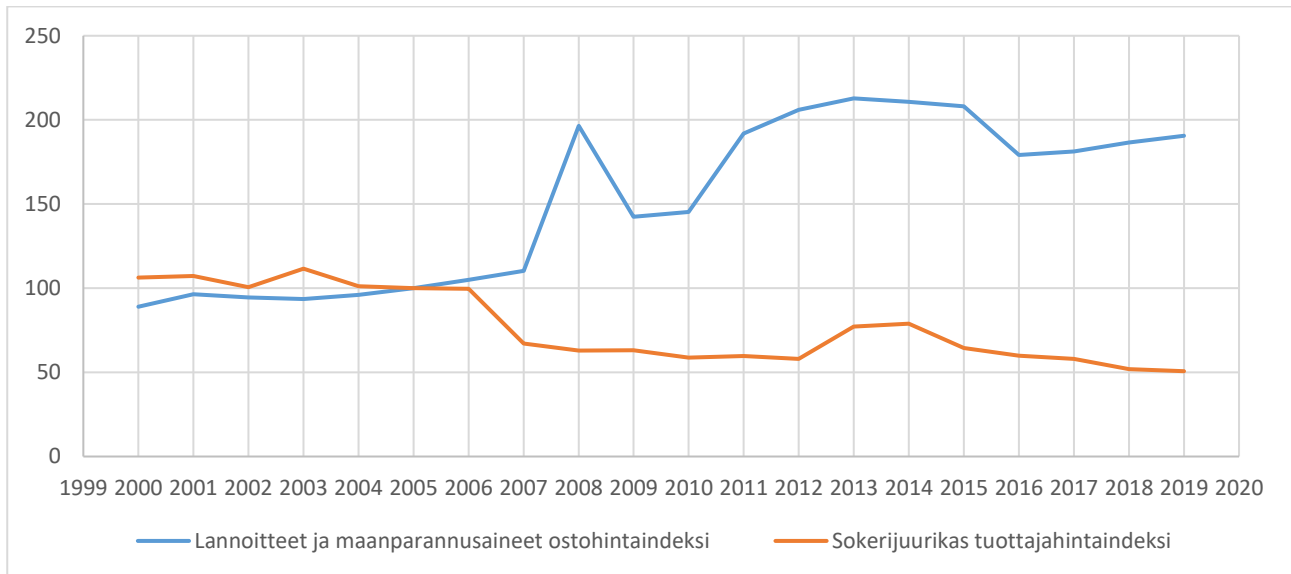
1.1 Tutkimuksen tausta

Kasvinviljelytilat ovat koko 2000-luvun kärsineet heikosta kannattavuudesta. Vuosina 2005–2019 kasvinviljelytilojen keskimääräinen kannattavuuskerroin oli 0,33 (Luke Taloustohtori, 2020). Kannattavuuskertoimen ollessa 1 omalle työlle ja pääomalle korvaukseksi jäävä yrittäjätulo vastaa tavoitteeksi asetettu palkka- ja korkovaatimusta. Kasvinviljelytilojen kannattavuuskertoimen arvon perusteella viljelijä ei ole saanut juuri palkkaa työstään, eikä sijoittamalleen pääomalle tuottoa. Kuviosta 1 voidaan nähdä, miten viljatilojen, peruna- ja juurikasvitilojen sekä muiden peltokasvitilojen kannattavuuskertoimet ovat vaihdelleet vuosittain.



Kuvio 1. Kasvinviljelytilojen kannattavuuskertoimet 2005–2018 (Luke Taloustohtori).

Kuviossa 2 on kuvattu lannoitteiden ja maanparannusaineiden ostohintaindeksi sekä sokerijuurikkaan tuottajahintaindeksi vuosina 2000-2019. Kuviossa 2 indeksin vertailuvuotena on käytetty vuotta 2005. Kuviosta 2 voidaan nähdä, että vuodesta 2005 lannoitteiden ostohintaindeksi on lähes kaksinkertaistunut, kun taas sokerijuurikkaan tuottajahintaindeksi on samassa ajassa puolittunut. Sokerijuurikkaan viljelyssä lannoituskustannukset ovat noin 30 % muuttuvista kustannuksista (Sucros Oy, sokerijuurikkaan kannattavuuslaskelma). Koska lannoituskustannukset ovat iso osa kaikista muuttuvista kustannuksista, on tärkeä varmistaa, että sokerijuurikasta lannoitetaan ainoastaan tarpeen mukaan.



Kuvio 2. Lannoitteiden ja maanparannusaineiden ostohintaindeksi ja sokerijuurikkaan tuottajahintaindeksi 2000–2019 (Tilastokeskus, 2020).

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, mikä tuotantofunktiomuoto parhaiten kuvaisi sokerijuurikkaan satovastetta typen suhteen. Tuotantofunktion selvittämisen jälkeen määritetään taloudellisesti optimaalinen typpilannoituksen taso sokerijuurikkaan tuotannossa.

Tutkimuksessa estimoidaan Sokerijuurikkaan tutkimuskeskuksen typpiporraskokeiden tulosten perusteella tuotantofunktio käyttäen kvadraatti-, neliöjuuri-, Mitscherlich-, lineaarifunktiota tasanteella (LRP-malli) sekä kvadraattifunktio tasanteella (QRP-malli). Tutkimuksen tavoitteena on selvittää,

- mikä tuotantofunktio parhaiten kuvaa sokerijuurikkaan satovastetta typpilannoituksen suhteen
- mikä on taloudellisesti optimityppilannoitustaso sokerijuurikkaan viljelyssä eri tuotantofunktiolla sekä
- mikä vaikutus panos- ja tuotoshintojen vaihtelulla on optimaaliseen typpilannoitukseen
- mikä on taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso, kun otetaan huomioon sokerijuurikkaan sokeripitoisuus?

2 Tutkimuksen teoreettinen tausta

2.1 Sokerijuurikkaan viljely Suomessa

Sokerijuurikasta viljeltiin Suomessa vuonna 2019 noin 11 000 ha pinta-alalla ja viljelijöitä oli vähän yli 600. Sokerijuurikkaan tuotanto on keskittynyt Suomen ainoan Säkylässä sijaitsevan sokeritehtaan läheisyyteen. Sokerijuurikkaan viljelypinta-alasta 48 % sijaitsi Varsinais-Suomessa ja 36 % Satakunnassa. Kotimaisesta sokerijuurikkaasta jalostettu sokeri täyttää noin puolet kotimaisesta sokerin kysynnästä (MTK, 2018).

Sokerin tuotanto Euroopassa ennen syyskuuta 2017 oli jaettu maakohtaisiin tuotantokiintiöihin. Suomen osalta tuotantokiintiö oli 81 000 tonnia polysukkeria (Liesivaara, 2011, 13). Sokerin tuotantokiintiöt poistuivat EU:ssa 2017 syyskuun lopussa, jonka jälkeen jokainen jäsenmaa on voinut tuottaa rajattomasti sokeria. Suomen ainoan sokeritehtaan Sucros Oy:n tavoitteena on kasvattaa sokerin tuotantoa Suomessa 100 000 tonniin vuodessa (Tanner, 2017, 3). Tämä tarkoittaisi nykyisen viljelypinta-alan kasvattamista nykyisestä n. 12000 hehtaarista 14 000 hehtaariin. Mikä tarkoittaisi 122 uutta sokerijuurikkaan viljelijää. Uusien viljelijöiden määrä on arvioitu käyttämällä viljelypinta-alana tämänhetkistä keskimääräistä sokerijuurikkaan viljelypinta-alaa 17,1 ha. Vuosina 2013–2020 sokerijuurikkaan keskimääräinen viljelypinta-ala Suomessa on ollut 11 700 ha.

2.2 Sokerijuurikkaan viljelyn edellytykset ja tekniikka

Sokerijuurikas on kaksivuotinen kasvi, joka ensimmäisenä vuonna kasvattaa lehdet ja pääjuuren. Pääjuureen sokerijuurikas varastoi sakkaroosin. Sokerin tuotannossa sokerijuurikas nostetaan maasta ensimmäisen kasvukauden lopussa ja sadoksi korjataan pääjuuret (Seppänen, 2012, 127). Sokerijuurikas on vaateliakas kasvi ravinteiden ja maan kasvukunnon suhteen. Se ei viihdy happamassa maassa vaan vaatii riittävän korkean pH:n, jotta mahdollistetaan hyvä juurikassato. Ohjearvoina maan pH:lle voidaan eloperäisillä mailla pitää 6,3–6,7, kivennäismailla 6,6–7,0 ja savimailla 6,8–7,4. Riittävän korkea pH nopeuttaa sokerijuurikkaan taimien alkukehitystä, kasvusto sulkeutuu nopeammin ja se pystyy käyttämään auringon säteilyenergia tehokkaasti hyväksi (Seppänen, 2012, 131).

Maan pH:n lisäksi maan rakenteen ja vesitalouden pitää olla kunnossa, kun tavoitellaan hyvää satotasoa sokerijuurikkaasta. Sokerijuurikas tarvitsee pitkän kasvukauden ja hyötyy aikaisesta

kylvöstä. Pellon vesitalouden ollessa kunnossa, voidaan sokerijuurikkaan kylvöt aloittaa keväällä aikaisemmin peltojen kuivuessa nopeammin. Vastaavasti syksyllä voidaan myöhästyttää korjuutöiden aloitusta, kun vesi ei jää pelloille haittaamaan nostoa. Aikaisella kylvöajankohdalla on todettu olevan vaikutusta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuden kehitykseen. Yhden kevätviikon vaikutus sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen on 0,20 prosenttiyksikköä per viikko eli viikkoa aikaisempi kylvö nostaa sokerijuurikkaan sokeripitoisuutta 0,20 % (Raininko, 1999, 27). Kaukoranta ja Hakala (2008) ovat tutkimuksessaan todennut, että sokerijuurikkaan kylvöajankohta on aikaistunut pitkän ajan keskiarvosta 2,9 päivällä vuosikymmenessä. Myöhäisellä korjuuajankohdalla on todettu olevan samanlainen vaikutus sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen. Yhden syysviikon on todettu nostavan sokeripitoisuutta 0,30 prosenttiyksikköä per viikko.

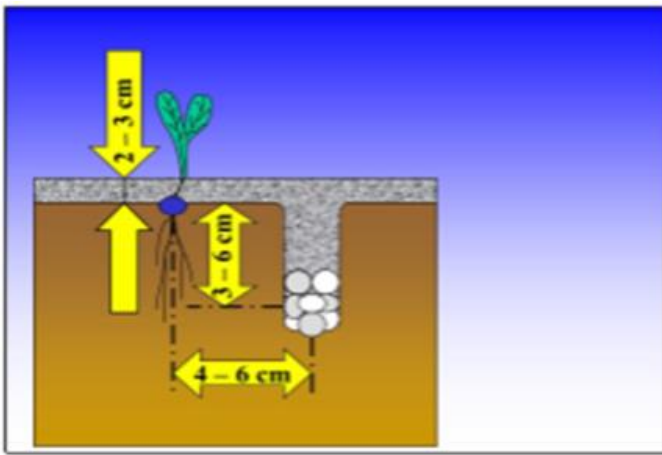
Lannoituksella on tärkeä merkitys sokerijuurikkaan viljelyssä. Sokerijuurikas ottaa osan ravinteista maaperästä. Useasti maaperässä olevia ravinteita ei ole riittävästi tai korkean pH:n vuoksi ne ovat hankalasti kasvin käytettävissä. Tällöin tarvitaan lisälannoitusta, jotta pystytään tuottamaan määrällisesti ja laadullisesti hyvä sato. Sokerijuurikkaan lannoitusta suunniteltaessa viljavuustutkimus on avainasemassa. Viljavuustutkimuksen perusteella voidaan arvioida sokerijuurikkaalle käyttökelpoisten ravinteiden määrää. Sokerijuurikkaalle tärkeitä pääravinteita ovat: typpi, fosfori, kalium, natrium, kalsium, magnesium sekä rikki. Lisäksi sokerijuurikas tarvitsee hivenravinteita kuten: mangaani, boori, kupari, sinkki ja rauta (Erjala, 1999a, 11). Sokerijuurikas tarvitsee 40 tonnin hehtaarisadon tuottamiseen 190 kg/ha typpeä, 35 kg/ha fosforia ja 220 kg/ha kaliumia sekä näiden lisäksi eri määrän muita ravinteita kasvukaudessa. Taulukosta 1 nähdään miten ravinteet ovat jakautuneet juuren ja lehtimassan kesken. Taulukosta voidaan nähdä, että joitakin ravinteita on enemmän lehdissä, kuin juuressa (Yara).

Taulukko 1. Sokerijuurikkaan ravinteiden otto (Yara).

Satotaso	N kg/ha	P kg/ha	K kg/ha	Na kg/ha	Ca kg/ha	Mg kg/ha	S kg/ha	B g/ha	Mn g/ha
40 t/ha juurisato	72	14	70	4	20	16	14	200	240
30 t/ha lehtimassa	120	21	150	48	40	18	11	110	170
Koko sato	192	35	220	52	60	34	15	310	410

Sokerijuurikkaan siemen on yksi-ituinen monosiemen. Siemen on pilleröity, jolloin se on mahdollista päällystää peittausaineilla. Peittausaineita tarvitaan tuhoeläinten, taimipoltteen ja sienitautien torjunnassa. Pilleröity siemen on 3,75–4,74 mm halkaisijaltaan ja ne on pakattu yhden yksikön laatikoihin, joka vastaa noin 100 000 siementä. Sokerijuurikas kylvetään tarkkuuskylvökoneella. Kylvö

tehdään riveihin, joiden väli on 45–50 cm. Rivissä taimiväli on yleensä 18–21 cm. Kylvössä tähdätään siihen, että hehtaarilla olisi n. 90000–100000 itänyttä siementä. Kylvösyvyyteen vaikuttavat kylvöhetkellä vaikuttavat olosuhteet. Tärkeää on, että siemen kylvetään kosteaan maahan. Yleensä sokerijuurikkaan kylvösyvyys on 2–3 cm. Kevyemmillä mailla voidaan kylvää matalaan, mutta savimailla voidaan kylvösyvyyttä joutua syventämään, jos pellon pinta on päässyt kuivumaan. On kuitenkin muistettava, että sokerijuurikkaan siemen on pieni, jolloin kylvösyvyys voi olla enintään 3 cm (Hoikkala, 1999a, 37–41). Suomessa sokerijuurikkaan kylvö suoritetaan yleensä yhdistelmäkylvönä, jolloin lannoite kylvetään sijoituslannoituksena lähelle siemenriviä 3–6 cm syvemmälle kuin siemen, ja 4–6 cm sivulle siemenrivistä (Seppänen, 2012, 132).



Kuvio 3. Havainnekuva sokerijuurikkaan kylvön teoriasta (Sucros Oy).

Sokerijuurikkaan alkukasvu on hidas ja se häviää kasvussa rikkakasveille ensimmäisten kasvuviikkojen aikana. Tämän takia rikkakasvien torjunta kasvukauden alussa on erittäin tärkeää. Rikkakasvit ottavat maasta ravinteita ja vettä kasvuaan varten ja nämä ravinteet ovat silloin pois viljelykasvilta (Turakainen, 2017, 18–19). Rikkakasvien torjunnassa voidaan käyttää kemiallisia rikkakasvien torjunta-aineita sekä mekaanista rikkakasvien torjuntaa, kuten haraus. Tuhoeläinten osalta torjuntaruiskutukset perustuvat kasvuston tarkkailun ja havaintojen perusteella tehtäviin päätöksiin. Siementen peittäminen on normaalisti riittävä toimenpide kirppojen ja luteiden torjuntaan sokerijuurikkaan taimettumisvaiheessa. Jos kuitenkin taimettuminen on hidasta voi olla tarpeen tehdä erillinen torjuntaruiskutus taimivaiheessa kirppoja ja luteita vastaan. Alkukehitystä voidaan nopeuttaa esi-idätetyillä siemenillä, jolloin taimettuminen on sekä nopeampaa että tasaisempaa (Eronen, 1999, 43).

Sokerijuurikkaan kasvussa lämpösummakertymällä ei ole sadollisesti merkittäviä etappeja. Lämpösumman avulla ei voida määrittää milloin juurikas alkaa tuleentua, toisin kuin esim. viljoilla. Sokerijuurikkaan juuren kasvu ja sokerin muodostuminen jatkuvat syksyä kohti aina pakkasiin asti. Valon määrän väheneminen ja lämpötilan lasku hidastavat kasvua ja sokerijuurikas alkaa valmistautua talveen. Yöpakkasilla on todettu olevan vaikutusta sokerin siirtymisessä lehdistä juureen (Seppänen, 2012, 132). Sokerijuurikkaan noston aloittamisen ajankohtaan vaikuttaa sokeritehtaan käyntikauden aloitusajankohta ja viljelijän sokerijuurikkaiden toimitusaikataulu. Sokeritehtaan käyntikausi alkaa yleensä lokakuun alussa ja sokerijuurikkaan nostot pelloilta aloitetaan hyvissä ajoin ennen tehtaan käynnistymistä. Eniten sokerijuurikkaan noston aloitusajankohtaan vaikuttaa viljelijän toimitusaikataulu, nostettava pinta-ala ja korjuuolot. Yleinen suositus on, että sokerijuurikas olisi nostettu sisämaassa lokakuun 20. päivään mennessä ja rannikolla lokakuun loppuun mennessä (Hoikkala, 1999b, 86–91).

Noston jälkeen osa sokerijuurikkaasta joudutaan varastoimaan ennen tehtaalte toimitusta. Sokerijuurikas ei tarvitse erillistä varastotilaa vaan se varastoidaan taivasalla aumassa, yleensä samalla pellolla, jossa se on kasvanutkin. Auman sijoituspaikkaan vaikuttaa eniten se, että sokerijuurikkaat pitää pystyä kuormaamaan siitä suoraan kuorma-autoihin ja aumalle vievän tien täytyy kestää raskaiden yhdistelmä ajoneuvojen paino. Sokerijuurikasta joudutaan Suomessa säilyttämään aumassa noin kaksi kolmas-osaa ennen tehtaalte toimitusta. Aumausaika vaihtelee muutamasta päivästä kahteen kuukauteen. Aumauksessa sokerijuurikas menettää osan painostaan, mikä johtuu juurikkaan kuivumisesta. Aumaukseen valitaan hyvälaatuisia juurikkaita, jotka on listitty hyvin ja ovat ehjiä ja puhtaita. Jäätäneitä ja pilaantuneita juurikkaita ei saa aumata. Aumat pitää peittää ennen sateita ja pakkasia (Erjala, 1999b, 96).



Kuvio 4. Sokerijuurikkaan kuormausta aumasta (Sucros Oy).

2.3 Sokerijuurikkaan typpilannoitus

Typen saanti on yksi tärkeimmistä kasvin kasvuun vaikuttavista tekijöistä. Vaikka 75 % ilmakehän kaasuista sisältää typpeä, vain harvat kasvit pystyvät suoraan hyödyntämään sitä (Draycott ym., 2003, 8). Pääasiassa kasvit ottavat käyttämänsä typen maasta. Vuonna 1804 sveitsiläinen kemisti ja kasvifysiologi Nicolas-Théodore de Saussure huomasi, että typpi on tärkeä kasviravinne ja kasvit ottavat sitä pääasiassa maaperästä (Barker ym., 2007, 23). Maassa suurin osa tyypestä on sitoutuneena maan orgaanisessa aineksessa (Draycott ym., 2003, 8). Orgaaninen aines muodostuu humuksesta, kasvitähteistä mikrobeista ja sienistä sekä maaperäeläimistä. Se toimii typen sekä myös fosforin ja rikin varastona. Orgaanisen aineksen osuus suomalaisessa peltomaassa on noin 0,5–60 % ja se sisältää typpeä keskimäärin 2000–4000 kg/ha (Muurinen, 2016a, 12). Kasvi ottaa maasta typpeä pääasiassa ammonium- (NH_4^+) ja nitraattimuodossa (NO_3^-) (Fagerstedt ym., 2016, 75). Maaperämikrobien toiminta vapauttaa typpeä kasville käyttökelpoiseen muotoon. Maassa olevan käyttökelpoisen mineraalitypen määrä vaihtelee vuosittain.

Typpi on sokerijuurikkaan tärkein kasviravinne ja vaikuttaa voimakkaimmin sokerijuurikkaan sadonmuodostukseen (Turakainen, 2009, 8). Liian alhainen typpilannoitus vähentää satoa ja liian korkea typpilannoitus alentaa sokerijuurikkaan sokeripitoisuutta sekä lisää sokerimehun epäpuhtauksia (Märländer, 1990, 328–330). Typpilannoitusta lisättäessä sokerijuurikkaan juurisato kasvaa pidempään, kuin sokerisato. Suomessa sokerijuurikkaan typen tarve on noin 160 kg/ha.

Alkukasvukaudesta sokerijuurikas tarvitsee typpeä lehtipinta-alan kasvattamiseen, jotta se saisi mahdollisimman suuren yhteyttämiseen tarvittavan lehtipinta-alan (Turakainen, 2009, 8). Lehtipinta-ala määrittelee kasvuston säteilyenergian vastaanottokyvyn ja vaikuttaa sadon määrään (Seppänen ym., 2012, 129–130). Watson (1947) esitteli käsitteen lehtialaindeksi LAI (leaf-area index). Lehtialaindeksillä tarkoitetaan kasvillisuuden lehtipinta-alan suhdetta vastaavaan maapinta-alayksikköön. Watson (1952) huomasi, että typpilannoitus nosti lehtialaindeksiä, lisäämällä lehtien kokoa ja määrää. Hän huomasi, että typpilannoituksen päätarkoitus oli auttaa kasvia kasvattamaan mahdollisimman nopeasti maanpinnan peittävä kasvusto, jotta se saisi kaiken auringon säteilyn käytettyä hyväkseen. Optimaalinen säteilyenergian vastaanotto saavutettiin, kun lehtialaindeksi sai arvon kolme (Draycott, 2003, 12).

Monteith (1978) teki mittauksia, miten eri lehtimäärät ottivat vastaan auringon säteilyä. Mittausten perusteella huomattiin, että sadon kuiva-ainesaanto kasvoi lineaarisesti sen mukaan, miten säteilyä vastaanotettiin. Scott ja Jaggard (1993) vertasivat neljän eri typpilannoitustason vaikutusta sokerijuurikkaan auringon säteilyn vastaanottoon. He huomasivat, että pienillä typpilannoitustasoilla lehdet kasvoivat hitaasti ja kasvi ei pystynyt hyödyntämään tehokkaasti auringon säteilyä. Typpilannoitustason ollessa 120 kg/ha tai yli, kasvi oli pystynyt heinäkuun loppuun mennessä saavuttamaan lehtialan, joka pystyi vastaanottamaan yli 85 % auringon säteilystä (Draycott, 2003, 12–13).

Vähenevän rajatuotoksen laki pätee myös sokerijuurikkaan typpilannoitukseen. Typpilannoitusta lisäämällä saadaan alussa sadonlisäystä aikaiseksi, mutta typen määrää edelleen lisättäessä lannoituksella saatu sadonlisä pienenee. Märlander (1990, 328) on tutkinut typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan laatuun ja saantoon. Hän huomasi, että typpilannoitus nostaa sokeri- ja valkosokerisaantoa tiettyyn pisteeseen asti, mutta suurilla typpilannoitustasoilla molemmat pienenevät. Saantoprosentti kertoo, kuinka monta prosenttia juurikkaassa olevasta sokerista saadaan talteen. Liian korkea typpilannoitus nostaa juurikkaan aminotyyppi-, kalium- ja natriumpitoisuutta ja saantoprosentti laskee (Raininko, 1999, 27–30).

Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus on omissa lannoitekokeissaan huomannut, että satovasteeseen riippuvuus typpilannoituksesta tulee selkeämmin esiin 45–50 tn/ha satotasoilla. Yli 60 tn/ha satotasoilla on lannoitusta nostamalla 150–160 kg/ha typpilannoitustasolle mahdollista vielä saada satovastetta. Yli 160 kg/ha typpilannoitustasoilla satovastetta ei enää saada (Muurinen, 2016b, 14). Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskuksen vuosina 2013–2016 tekemien typpiporraskokeiden tulosten perusteella optimaalinen typpilannoitustaso olisi 140–160 kg/ha (Muurinen, 2017, 14).

Suomessa typpilannoitteiden käyttöä rajoitetaan valtioneuvoston asetuksella eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta (VNA 1250/2014) eli ns. nitraattidirektiivillä (91/676/ETY), jonka tarkoituksena on ehkäistä ja vähentää lannoitteiden käytöstä aiheutuvia päästöjä. Nitraattiasetuksessa liukoisen typen vuotuiseksi enimmäismääräksi (kg/ha) sokerijuurikkaalle kivennäismailla on määritetty 170 kg/ha ja eloperäisillä mailla 130 kg/ha (VNA 1250/2014). Ympäristökorvauksen sitoumuksen tehneillä tiloilla typpilannoitus lasketaan lohko-kohtaisesti kasvin, maan multavuuden ja satotason perusteella. Ympäristökorvauksen typpilannoitusrajat ovat tiukemmat, kuin nitraattidirektiivin määrittelemät typpilannoitustasot. Ympäristö-

korvauksen sokerijuurikkaalle määritelty typpilannoituksen enimmäismäärä (kg/ha/v) on eloperäisillä mailla 120 kg/ha ja 140 kg/ha muilla multavuusluokilla (vähämultaiset, multavat, runsasmultaiset ja erittäin runsasmultaiset). Sokerijuurikkaalle ei ympäristökorvauksessa ole määritelty saavutettuun satotasoon perustuvia typpilannoitusrajoja, vaan satotasosta riippumatta typpilannoitus on enimmillään joko 120 kg/ha tai 140 kg/ha (Ruokavirasto, 2020).

Sokerijuurikkaan lannoitus perustuu kasvin tarpeisiin. Lannoitussuunnitelma perustuu viljavuustutkimuksen tuloksiin ja sen lisäksi huomioidaan lohkolla aiemmin ollut kasvi, mahdollinen karjanlannan määrä ja ympäristökorvauksen ehdot. Lähtökohtana sokerijuurikkaan typpilannoituksen laskennalle käytetään sen tyyppien tarvetta 160 kg/ha. Typpilannoitusta on mahdollista alentaa maan multavuuden perusteella. Esimerkiksi erittäin runsas multaisilla mailla typpilannoitusta on mahdollista vähentää 30 kg/ha, kun taas multavilla mailla vähennys on vain 7,5 kg/ha. Lohkolla edellisenä vuonna ollut esikasvi vaikuttaa myös typpilannoitustasoon. Jos lohkolla on ollut esikasvina sokerijuurikas ja naatit on kynnetty maahan, typpilannoitusta voidaan vähentää 40 kg/ha. Vastaavasti jos esikasvina on ollut vilja ja oljet on kynnetty maahan, typpilannoitusta on mahdollista kasvattaa 10 kg/ha. Typpilannoitusta on mahdollista tarkentaa satotason ja kasvukunnon perusteella. Alle 38 tn/ha satotasoilla typpilannoitusta ei ole tarvetta vähentää. Hyvän kasvukunnon ja korkean pH:n omaavissa maissa, jossa satotaso on ollut tasolla 45 tn/ha, voidaan typpilannoituksen vähentämistä 5–10 % harkita (Turakainen, 2009, 9–10).

2.4 Tuotantofunktio

Tuotantofunktio kuvaa sitä suhdetta, miten annetulla panosmäärällä on mahdollista tuottaa suurin mahdollinen tuotismäärä (Rasmussen, 2012, 12–13). Klassisessa tuotantofunktiossa on kaksi oletusta, jotka ovat tuotosten ja panosten jaettavuus sekä oletus, että kaikilla panoksilla on sama tuotantovaikutus eli panokset ja tuotokset ovat homogeenisia. Panosten ja tuotosten jaettavuus on edellytys sille, että tuotantofunktio voidaan piirtää jatkuvaksi käyräksi. Jos tuotokset tai panokset eivät olisi jaettavia, tuotantofunktion kuvaajaa ei olisi mahdollista piirtää jatkuvana. Samalla tuotantovaikutuksella tarkoitetaan sitä, että tuotoksen vaihtelut eivät johdu panoksen laatueroista. Sekä tuotetut erät ovat samanarvoisia (Doll & Orazem, 1984, 30).

Tuotantofunktio kirjoitetaan yleisessä muodossa seuraavasti:

$$y = f(x) \quad (2.1)$$

mikä matemaattisesti kerrottuna ilmaisee tuotoksen (y) panosmuuttujan (x) suhteen (Debertin, 2012b, 17). Tuotoksen määrään vaikuttaa kuitenkin aina useampi tekijä ja yleensä esitystä havainnollistaessa tarkastellaan yhden muuttuvan panoksen vaikutusta tuotokseen ja muiden panosten määrän oletetaan pysyvän vakiona, tällöin funktio voidaan esittää muodossa:

$$y = f(x_1|x_2, x_3, x_4, x_5, \dots, x_n) \quad (2.2)$$

missä y on tuotos, esimerkiksi sato eli tässä tutkimuksessa sokerijuurikkaan juurisato, x_1 kuvaa muuttuvaa panosta esimerkiksi lannoite eli tässä tutkimuksessa typpilannoituksen määrää. Typpilannoitusta muutettaessa, muut panokset (x_2, x_3, \dots, x_n) pidetään määrältään vakioina (Debertin, 2012b, 17).

Tuotantofunktio muodon valintaan ei ole mitään yksiselitteistä sääntöä. Valinta määräytyy usein sen perusteella, mitä alueita funktiosta halutaan kuvata (Rasmussen, 2012, 17). Maataloustuotanto noudattaa useasti ns. vähenevän rajatuotoksen lakia (Ryhänen ym., 2018, 91). Vähenevän rajatuotoksen lailla tarkoitetaan sitä, että lisättäessä yhtä muuttuvaa panosta muiden panosten pysyessä vakiona, jokaista lisättyä muuttuvaa panosyksikköä kohti saadaan yhä pienempi lisätuotos, joka lopulta muuttuu negatiiviseksi (Rasmussen, 2012, 14). Tämän takia tuotantofunktioksi valitaan usein käyrämuotoinen funktio (Debertin, 2012b, 19). Tutkimuksissa käytetäänkin usein epälineaarisia funktiomuotoja kvadraatti-, neliöjuuri-, Cobb-Douglas- ja Mitscherlich-funktiota (Juntti, 2003, 18).

Juntti (2003, 24–26) on tarkastellut typpilannoituksen ja kasvinsuojeluaineiden käytön vaikutusta mallas- ja rehuohran taloudelliseen tulokseen. Hän valitsi käytettävän tuotantofunktion vertailemalla neliö- ja Mitscherlich-funktioiden selitystasetta. Tutkimuksessa päädyttiin käyttämään neliöfunktiota, sen kuvatessa parhaiten mallasohran tuotantofunktiota. Lineaarista funktiomuotoa käytettiin tutkimuksessa kuvaamaan typpilannoituksen vaikutusta mallasohran valkuaispitoisuuteen.

Cerrato ja Bläckmer (1990, 138–143) vertasivat eri tuotantofunktioita selvittäessään typpilannoituksen vaikutusta maissisatoon. Tutkimuksessa käytettiin lineaarifunktiota tasanteella (LRP-malli), kvadraattifunktiota tasanteella (QRP-malli), kvadraattifunktiota, eksponentiaalifunktiota (Mitscherlich) sekä neliöjuurifunktiota. Tutkimuksen mukaan, selitystasteen perusteella, kaikki

funktiomuodot antoivat saman satovasteen. Kaikki mallit myös ennustivat biologisesti suurimman sadon samalle tasolle, vaikkakin neliöjuurifunktiolla oli taipumus ennustaa satotaso hiukan suuremmaksi, kuin muilla malleilla. Tutkimuksessa huomattiin, että taloudellisesti optimaalista typpilannoitustasoa määritettäessä. Eri tuotantofunktiomuodot erosivat toisistaan, kvadraattifunktiolla oli tapana arvioida optimaalinen typpilannoitustaso liian suureksi. Kvadraattifunktion tasanteella todettiin tässä tutkimuksessa kuvaavan parhaiten typpilannoituksen satovastetta maissilla.

Jurkola (2019, 18) käytti maisterintutkielmassaan funktiomuotoina kvadraattifunktiota, Mitscherlich-funktiota sekä funktiota tasanteella (LRP-malli) tutkiessaan, mikä tuotantofunktio muoto parhaiten kuvaa mallasohran satovastetta sekä mikä on panos- ja tuotoshintojen vaikutus taloudellisesti optimaaliseen mallasohran typpilannoitukseen. Tutkimuksessa parhaiten satovastetta kuvailivat kvadraatti- ja Mitscherlich-funktio, neliöjuurifunktiolla lannoitussuositus nousi epärealistisen korkeaksi (Jurkola, 2019, 53–54).

Jaggard ja Armstrong (2009, 287) tutkivat typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan satoon. He käyttivät tutkimuksessaan kolmea eri funktiomuotoa Mitscherlich-funktiota, lineaarifunktion ja eksponentiaalifunktion yhdistelmää sekä bilineaarifunktiota tutkiessaan sokerijuurikkaan satovastetta. Tutkimuksessa käytetty funktiomuoto valittiin vertailemalla valittujen funktiomuotojen selitystasoa sekä F testin merkitsevyystasoa. tutkimuksessa huomattiin, että Mitscherlich-funktio toimi parhaiten tapauksissa, joissa satovaste reagoi positiivisesti typpilannoitukseen ja lähestyi biologisesti maksimia. Tilanteissa, jossa suurilla typpilannoitus tasoilla satotaso jää alhaiseksi, malli epäonnistuu. Jaggard ja Armstrong päätyivät käyttämään bilineaarifunktiota omassa tutkimuksessa. Päätökseen vaikutti se, että Mitscherlich-funktion sekä lineaarifunktion ja eksponentiaalifunktion yhdistelmän antamat regressiokertoimet, olivat heidän käytössään olleella aineistolla välillä järjettömiä. Bilineaarifunktio taas kuvasi uskottavasti satovasteen useammissa tapauksissa ja antoi suoraan optimaalisen typpilannoitustason, jolla saavutetaan maksimi sokerisato. Bilineaarifunktion ominaisuus on, että se antaa pienemmän optimaalisen typpilannoitustason, kuin Mitscherlich- tai lineaarifunktion ja eksponentiaalifunktion yhdistelmä (Jaggard ym., 2009, 289–290).

Neeteson ja Wadman (1986, 37) tutkivat mikä olisi taloudellisesti optimaalisin typpilannoitustaso perunalle ja sokerijuurikkaalle. He käyttivät omassa tutkimuksessansa kvadraattifunktiota ja muunnettua eksponentiaalifunktiota, jossa eksponenttifunktioon lisättiin lineaaritermi. Mallien hyvyttä verrattiin jäännösneliösumman (RSS) avulla. Tutkimuksessa huomattiin, että yleisesti

kvadraattifunktio antoi optimaaliselle typpilannoitukselle korkeamman lannoitussuosituksen. Otettaessa jäännösneliösumma huomioon muunnettu eksponentiaalifunktio antoi tarkemmat tulokset (Neeteson ym., 1986, 37–47).

Sayili ja Akca (2004, 529-531) tutkimuksessaan vertailivat yhdeksää eri tuotantofunktiomallia, tutkiessaan typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan satovasteeseen. He olivat valinneet tutkimukseensa lineaarifunktion, kvadraattifunktion, neliöjuurifunktion, logaritmifunktion (log-log), semi-logaritmifunktion (lin-log), semi-logaritmifunktion (log-lin), kolmannen asteen funktion, Cobb-Douglas-funktion sekä käänteislukufunktion. Tutkimuksessa tuotantofunktiomallia valitaessa yhtenä tärkeänä kriteerinä oli mallin sopivuus vähenevän rajatuotoksen lakiin. Malleja vertailtiin toisiinsa selitystason ja keskivirheen avulla. He päätyivät omassa tutkimuksessaan johtopäätökseen, että kvadraattifunktio selitti parhaiten satovastetta (Sayili ym., 2004, 529-531).

2.5 Taloudellisen optimin määrittäminen

Maatilayritysten, kuten muidenkin yritysten, tavoitteena on toimia kannattavasti. Kannattavaa toiminta on silloin, kun yrityksen saamat tulot ovat suuremmat, kuin toiminnan kulut (Neilimo, 2017, 20–21). Taloustieteessä on suurimassa määrin kyse rahasta, näin on myös tuotantoekonomiassa (Rasmussen, 2012, 7). Tuotantoteorian keskeinen oletus on voiton maksimointi ja/tai kustannusten minimointi (Ryhänen ym., 2018, 97). Koska kasvintuotanto noudattaa vähenevän rajatuotoksen lakia, satotason maksimointi ei yleensä ole taloudellisesti kannattavaa. Biologisen maksimisadon tavoitteleminen on kannattavaa tilanteissa, jossa panokset ovat ilmaisia (Kässi, 2009, 7). Vähenevän rajatuotoksen lain perusteella satotason nousu suhteessa käytettyihin panoksiin pienenee lähellä maksimi satotasoa eli hukkaamme panoksia saatuun hyötyyn nähden (Juntti, 2003, 21; Laurila 1992, 21). Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso voidaankin määrittää vertailemalla tuotos- ja panoshintojen välistä hintasuhdetta rajatuotokseen (Ryhänen ym., 2018, 100).

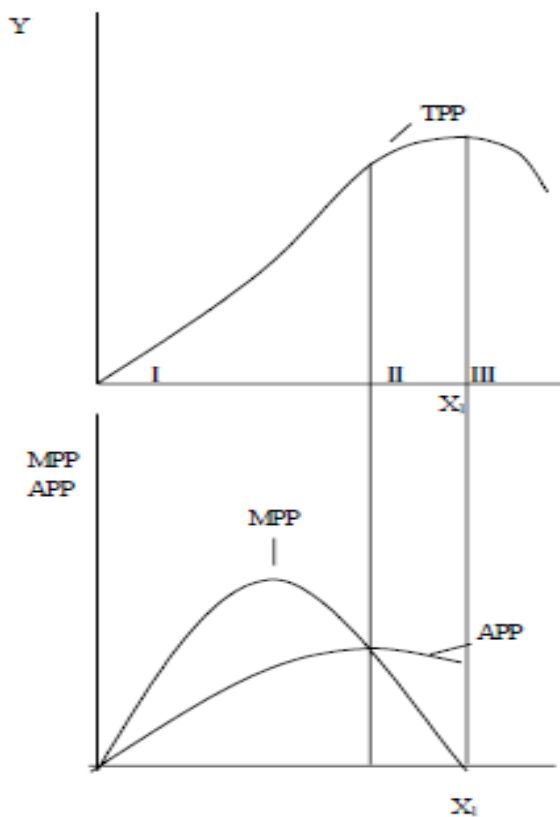
Tuotantofunktiosta on mahdollista johtaa kaksi tuotantoekonomialle tärkeitä käsitettä: MPP (marginal physical product) ja APP (average physical product) (Ryhänen ym., 2018, 88–89). Rajatuotos (MPP) kuvaa miten tuotos muuttuu, kun panosta kasvatetaan yhden yksikön verran (Debertin, 2012b, 21), ja se voidaan matemaattisesti esittää seuraavasti:

$$MPP = \frac{df(x)}{dx} \quad (3.1)$$

Keskimääräinen tuotos (APP) taas kuvaa keskimääräistä suhdetta, miten panos muuttuu tuotokseksi (Debertin, 2012b, 21), ja se voidaan matemaattisesti esittää seuraavasti:

$$APP = \frac{f(x)}{x} = \frac{y}{x} \quad (3.2)$$

Kuvio 5 esittää klassista tuotantofunktiota ja sen kolme osa-aluetta. Klassista tuotantofunktiota käytetään yleisesti kuvaamaan maatalouden tuotantosuhteita (Rasmussen, 2012, 15).



Kuvio 5. Klassinen tuotantofunktio ja sen kolme aluetta (Doll & Orazem, 1984, 38).

Klassista tuotantofunktiota voidaan käyttää apuna taloudellisesti optimaalista tasoa määrittäessä. Kuviossa 5 alueella I rajatuotos (MPP) pysyy korkeampana, kuin keskimääräinen tuotos (APP). Keskimääräinen tuotos kasvaa alueen I loppuun. Tämän takia tuotantoa kannattaa lisätä alueen I loppuun asti. Alueella II tuotos edelleen kasvaa, mutta hidastuvasti eli jokainen lisätty panos kasvattaa tuotosta vähemmän kuin edellinen. Rajatuotos laskee ja on pienempi, kuin keskimääräinen tuotos, mutta nollan yläpuolella. Alue II päättyy biologisesti maksimituotokseen, jonka jälkeen alkaa alue

III, joka on laskevan tuotoksen vaihe. Satotaso ei enää nouse, vaikka panoksia lisätään ja rajatuotos on negatiivinen. Taloudellisesti optimi tuotos sijoittuu alueelle II (Kässi, 2009, 6–9).

Kuten jo edellä mainittiin maatilayrityksen tavoitteena, on voiton maksimointi. Voitto määritetäänkin tuottojen ja kustannusten erotuksena (Neilimo, 2017, 20–21):

$$\text{Tuotot} - \text{Kustannukset} = \text{Voitto/Tappio} \quad (3.3)$$

Voittofunktio voidaan johtaa tuotantofunktiosta, kokonaistuoton TR (total revenue) ja kokonaistuotantotekijänmenojen TFC (total factor costs) erotuksena, seuraavalla tavalla (Rasmussen, 2012, 21):

$$\pi = TR - TFC = py - wx = pf(x) - wx, \quad (3.4)$$

yhtälössä p kuvaa tuotoshintaa ja w panoshintaa. Voittofunktion maksimipiste voidaan määrittää derivoimalla yhtälö $pf(x) - wx$, x :n suhteen, ja asetetaan yhtälö vastaamaan nollaa. Taloudellisesti optimaalinen tuotosmäärä on tällöin:

$$p\left(\frac{df(x)}{dx}\right) = pMPP = VMP = w, \quad (3.5)$$

missä VMP on rajatuotos (MPP) kerrottuna tuotoksen hinnalla. Yhtälö voidaan esittää myös muodossa:

$$MPP = \frac{w}{p}, \quad (3.6)$$

eli taloudellisesti optimi panoskäytön taso löytyy pisteestä, jossa rajatuotos (MPP) ja panos-tuotoshintojen suhde on yhtä suuri. Taloudellisesti optimaalinen panoskäyttö laskee, jos panoksen hinta nousee tai tuotoksen hinta laskee. Panoskäyttöä voidaan vastaavasti lisätä, kun panosten hinta laskee tai tuotoksen hinta nousee (Rasmussen, 2012, 21–24).

Taloudellisesti optimaalinen panoskäyttö on mahdollista selvittää myös kustannusten avulla. Tällöin keskeisimmät käsitteet ovat rajakustannus MC (marginal cost) ja rajatuotto MR (marginal revenue). Rajakustannuksella tarkoitetaan kustannusta, joka aiheutuu yhden lisäyksikön tuottamisesta.

Rajatuotto tarkoittaa tuottoa, joka saadaan yhden lisäyksikön myymisestä. Taloudellisesti optimaalinen eli voiton maksimoiva piste löytyy kohdasta, jossa rajatuotto ja rajakustannus on yhtä suuri (Debertin, 2012, 68):

$$MR = MC \qquad (3.7)$$

Taloudellisesti optimaalinen panoskäyttö on sama kummallakin tarkastelutavalla.

3 Aineisto ja menetelmät

3.1 Sokerijuurikkaan tutkimuskeskuksen typpilannoituskoeaineisto

Tutkimuksen aineistona on Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskuksen vuosina 2013–2020 suorittamien typpiporraskokeiden tulokset. Typpilannoituskokeet oli suoritettu viiden kerranteina ja testituloksia oli yhteensä 830 kappaletta. Typpilannoitustasoina oli käytetty 90, 110, 120, 140, 160, 200 ja 220 kg/ha. Nollaruutuina käytettiin kahdenlaisia testiruutuja, ei mitään lannoitusta sekä kaikki muut ravinteet paitsi typpi. Lisäksi typpilannoitus tasoilla 90, 110, 120, 140 ja 160 oli suoritettu kokeita jaetulla lannoituksella, jossa osa typpilannoituksesta annettiin kasvukauden aikana. Taulukossa 2 on eri vuosina suoritettujen lannoituskokeiden testijäsenet.

Taulukko 2. Lannoituskokeen typpilannoitustasot

tri	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	Ei lann.	Ei lann.	Ei lann.	Ei lann.	Ei lann.	Ei lann.	Ei lann.	N140
2	N0	N0	N0	N0	N0	N0	N0	N60+80
3	N140	N90	N90	N90	N90	N90	N90	N80+60
4	N115+25	N110	N110	N110	N110	N110	N110	N115+25
5	N115+25	N140	N140	N140	N140	N140	N140	N60+80
6	N110	N160	N160	N160	N160	N160	N160	N80+60
7	N85+ 25	N200	N200	N200	N200	N200	N200	N115+25
8	N90	N220	N220	N220	N220	N220	N220	N115+25
9	N65+25	N85+ 25	N65+25	N65+25	N65+25			N115+25
10	N160		N85+ 25	N85+ 25	N85+ 25			N115+25
11	N200		N95+25	N115+25	N115+25			N115+25
12	N220		N115+25	N135+25	N135+25			
13								Ei lann.
14								N0
15								N90
16								N110
17								N140
18								N160
19								N220

Aineisto sisältää tiedon koepaikasta, kokeen numerotunnuksen ja kerranteen numeron. Lisäksi aineisto sisältää tiedon sadosta (kg/ha), sokeripitoisuuden (%) ja sokerisadon. Näytteistä on myös analysoitu sokerijuurikkaan tekniseen laatuun sokeripitoisuuden lisäksi vaikuttavia tekijöitä, kuten amino-

typpipitoisuus (mg/100 g juurikasta), kaliumpitoisuus (mg/100 g juurikasta) ja natriumpitoisuus (mg/100 g juurikasta) sekä osasta näytteistä myös multapitoisuus (%).

Koepaikoilta oli saatavilla myös viljavuustiedot lohkon maalajista sekä viljavuudesta, pH:sta, lohkon johtoluku sekä ravinnetiedot seuraavista ravinteista: Kalsium (Ca), Kalium (K), Fosfori (P), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Mangaani (Mn), Boori (B), Kupari (Cu), Sinkki (Zn), Rikki (S). Sokerijuurikkaan juurisadot vaihtelivat aineistossa 17368-105625 kg/ha välillä, sokeripitoisuus 14,98-21,07 % välillä sekä sokerisato 3030,7-16741,6 kg/ha välillä. Keskimääräinen juurisato oli 56695 kg/ha, sokeriprosentti 17,66 % ja sokerisato 9958 kg/ha. Koevuosien välillä oli sokerijuurikkaan juurisadossa vaihtelua, varsinkin vuoden 2019 juurisato oli selvästi suurempi, kuin edellisinä vuosina. Koetulosten vertailuna Sucros Oy:n viljelijöiden viiden vuoden keskisato 2016-2020 on 38,8 tn/ha ja sokeriprosentti 16,81 % ja sokerisato 6,50 tn/ha. Lannoituskokeiden koepaikkojen maalajit olivat pääsääntöisesti hietasavea sekä hiuesavea, multavuus luokka oli multava. Tutkimuksessa käytettäviä tietoja ovat typpilannoitustaso, juurisato (kg/ha) sekä sokeripitoisuus (%). Lannoitustasoista täysin ilman lannoitusta olevien 0-ruutujen tuloksia ei oteta mukaan estimointeihin.

3.2 Tutkimusmenetelmät

Ekonometriset menetelmät, kuten regressioanalyysi, voivat auttaa suunnittelua ja päätöksentekoa epävarmoissa tilanteissa. Klassinen lineaarinen regressioanalyysi on tapa kuvata kahden tai useamman muuttujan välistä suhdetta. Yksi tärkeä tekijä regressioanalyysissä on kahden muuttujan välinen kausaalisuhde eli miten muuttujat vaikuttavat toisiinsa (Asteriou & Hall, 2016, 30). Hyvä malli saadaan aikaiseksi, kun mallin rakentamiseen käytetään aikaa ja valitaan muuttujat huolellisesti. Tässä tutkimuksessa selittävänä muuttujana on typpilannoitus ja selitettävänä muuttujana sokerijuurikkaan juurisato.

Tutkimuksessa estimoidaan sokerijuurikkaan juurisadon määrää eri typpilannoitustasoilla ja selvitetään tuotantofunktiomuoto, joka parhaiten kuvaa typpivastetta. Aineiston analysointi tehdään regressioanalyysin avulla käyttäen pienimmän neliösumman menetelmää (OLS) (Kennedy, 2008, 5). Pienimmän neliösumman menetelmä perustuu regressioanalyysin jäännöstermien tarkasteluun. Regressiomallia käytettäessä jokaiselle muuttujan arvolle y_i voidaan määritellä ennusteen arvo \hat{y}_i . Ennusteen arvo saattaa kuitenkin poiketa huomattavasti todellisesta y_i :n arvosta ($y_i - \hat{y}_i$) ja tätä poikkeamaa kutsutaan jäännöstermiksi (Kennedy, 2008, 12-13). Pienimmän neliösumman

menetelmällä pyritään määrittelemään sellainen regressiosuora, jota käytettäessä neliöityjen jäännöstermien summa on mahdollisimman pieni. Mitä pienempi neliösumma on, sitä paremmin regressiosuora kuvaa aineistoa (Nummenmaa ym., 2018, 238).

Tuotantofunktioimuotoina tutkimuksessa käytetään kvadraatti-, neliöjuuri- ja Mitscherlich-funktiota, lineaarista funktiota tasanteella (LRP-malli) sekä kvadraattista funktiota tasanteella (QRP-malli). Tutkimuksessa käytettävät funktiomuodot on esitetty matemaattisessa muodossa alla:

Kvadraattifunktio:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 \quad (4.1)$$

Neliöjuurifunktio:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 \sqrt{x} \quad (4.2)$$

Mitscherlich-funktio:

$$y = m(1 - ke^{-\beta x}) \quad (4.3)$$

Lineaarinen funktio tasanteella (LRP-malli): (4.4)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x, \text{ jos } x < x_m$$

$$y = P, \text{ jos } x \geq x_m$$

maksimi satotaso

$$y_m = \beta_0 + \beta_1 x_m$$

Kvadraattinen funktio tasanteella (QRP-malli): (4.5)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2, \text{ jos } x < x_m$$

$$y = y_m, \text{ jos } x > x_m$$

$$x_m = -\frac{\hat{\beta}_1}{2\hat{\beta}_2} \Leftrightarrow \hat{\beta}_2 = -\frac{\hat{\beta}_1}{2x_m}, \text{ ja}$$

maksimi satotaso

$$y_m = \hat{\beta}_0 - \frac{\hat{\beta}_1^2}{4\hat{\beta}_2}$$

Tutkimuksessa estimoidaan ensin tuotantofunktiot typpiporraskoe aineistosta yllä olevia funktiomuotoja käyttäen. Eri funktiomuotoihin perustuvia malleja arvioidaan mallien selityksasteen perusteella. Selityksaste tarkoittaa, kuinka paljon muuttujan y vaihtelusta selittävä muuttuja selittää eli kuinka luotettava mallin antama ennuste on. Selityksaste R yhden muuttujan tapauksessa voidaan laskea korrelaatiokertoimen r avulla (Nummenmaa ym., 2018, 251):

$$\text{selityksaste } R^2 = r^2 * 100 \% \quad (4.6)$$

Selityksaste antaa siis prosenttiluvun siitä, kuinka paljon selitettävän muuttujan Y arvojen vaihtelusta selittävä muuttuja X selittää. Selityksasteen jäädessä pieneksi, X ei yksinään selitä Y :n arvojen vaihtelua vaan suurin osa vaihtelusta johtuu muista syistä (Nummenmaa ym., 2018, 251). Selityksastetta voidaan käyttää yhtenä kriteerinä selittäviä muuttujia valittaessa. Suuri selityksaste ei takaa sitä, että ennuste on tarkka. Myös muita kriteereitä on käytettävä, kun arvioidaan mallin sopivuutta (Nummenmaa ym., 2018, 252). Regressioanalyysissä jokaiselle muuttujalle lasketaan regressiokerroin. Mallia voidaan myös tarkastella siitä näkökulmasta, kuinka eri selittävillä muuttujilla on merkitystä mallin kannalta ja ovatko ne tilastollisesti merkittäviä (Nummenmaa ym., 2018, 252). T-testin avulla voidaan selvittää yksittäisen selittävän muuttujan tilastollinen merkitsevyys (Fabozzi ym., 2014, 49).

Kilpailevia malleja valittaessa on hyvä tehdä hypoteesitestausta, ovatko mallit sisäkkäisiä (nested model) vai eivät (non-nested model). Mallit ovat sisäkkäiset, jos rajoitetumpi malli voidaan esittää laajemmasta mallista asettamalla laajemman mallin parametreille rajoitteita. Jos nollahypoteesi hylätään, rajoitetumpi malli ei ole niin hyvä, kuin laajempi malli (Schabengerger, 2002, 7). Mallit eivät ole sisäkkäisiä, jos mallia ei voi määrittää toisesta mallista rajoitteiden avulla. Non-nested -mallien vertaaminen tapahtuu joko non-nested F-testin tai J-testin avulla (Kennedy, 2008, 77–78). Non-nested malleja on myös mahdollista vertailla käyttämällä Mallow's C_p , Akaike informaatiokriteeriä (AIC) (Schabengerger, 2002, 7) tai Bayesian informaatiokriteeriä (BIC) (Schwarz, 1978, 461–464). Molemmissa Akaike- ja Bayesian informaatiokriteerissä pienin informaatiokriteerin arvo viittaa paremmin sopivaan malliin. Kumpikin malleista lisää rangaistuskertoimen selittävien muuttujien määrän perusteella. Koska rangaistuskerroin on Bayesian informaatiokriteerissä suurempi se pyrkii suosimaan yksinkertaisempia malleja kuin Akaike informaatiokriteeri (Verbeek, 2017, 69–70).

Tuotantofunktioiden estimoinnissa käytetään usein myös malleja, jotka sisältävät dummy-muuttujia. Dummy-muuttuja on muuttuja, joka saa joko arvon yksi tai nolla. Arvon yksi se saa, kun ilmiö esiintyy ja nolla, jos se ei esiinny (Kennedy, 2008, 232). Dummy-muuttujia voidaan käyttää kvalitatiivisten tai luokiteltujen muuttujien pisteyttämiseen, jotta ne on mahdollista ottaa mukaan analyysiin. Esimerkiksi vuosittaisten vaihteluiden huomioimisessa regressioanalyysissä (Asteriou & Hall, 2016, 210-227). Tässä tutkimuksessa dummy-muuttujia käytetään eri testipaikkojen ja vuosien välistä juurisatoa ja sokeripitoisuutta arvioitaessa sekä verrattaessa jaetun ja ei jaetun lannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan juurisatoon ja sokeripitoisuuteen.

Suomessa kasvien lannoitus perustuu yleensä viljavuustutkimuksen tuloksiin, ja ne suosittelevat yleensä seoslannoitteiden käyttöä lannoituksessa. Seoslannoitteita käytettäessä lannoitepanosten, kuten typpi, fosfori ja kalium, käyttösuhde on vakio ja täydellinen multikollineaarisuus on tavallista (Ryhänen, 1996, 12). Täydellinen multikollineaarisuus on kyseessä tilanteessa, jossa regressiomallin muuttujat ovat toistensa lineaarikombinaatioita. Multikollineaarisuus johtaa estimoinnin ongelmiin ja regressiokertoimien epätarkkuuteen (Kennedy, 2008, 192–193). Multikollineaarisuuden välttämiseksi kaksi selittävää muuttujaa joukosta typpi, fosfori ja kalium jätetään pois ja selittävänä muuttujana käytetään vain tyypilannoitusta (Juntti, 2003, 20).

Tutkimuksessa vertaillaan myös tyypilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen. Sokerijuurikkaan hinnoittelussa viljelijä saa sadolle lisähintaa sokerijuurikkaan sokeripitoisuuden mukaan. Sokerijuurikkaan perushinta on määritelty juurikkaalle, jonka sokeripitoisuus on 16,0 %. Sokeripitoisuuden ylittäessä 16 % perushintaa korotetaan 0,9 % jokaisesta 0,1 % sokeripitoisuusyksikön noususta. Jos sokeripitoisuus jää alle 16,0 % hintaa alennetaan vastaavan kaavan perusteella (Sucros, 2017, 15–16). Sokeripitoisuuslisä lasketaan seuraavan kaavan mukaan:

$$\text{Sokeripit. lisä} = \left((\text{sadon sokeripitoisuus} - 16 (\text{vakiolaatu})) * 0.09 \right) * \text{perushinta} \quad (4.6)$$

Tyypilannoituksen vaikutus sokeripitoisuuteen tutkitaan regressioanalyysillä käyttäen lineaari-, kvadraatti- tai neliöjuurifunktiota. Näiden funktioiden avulla määritetään lannoitustaso, jolla sokeripitoisuus ei laske alle 16,0 %. Typpiporraskoe aineisto sisältää tiedon sokerijuurikkaan aminotyyppi-, kalium- ja natriumarvoista. Näiden arvojen ja sokeripitoisuuden avulla olisi mahdollista laskea saantoprosentti. Saantoprosentti kertoo sen, kuinka monta prosenttia juurikkaassa olevasta

sokerista saadaan talteen. Aminotyyppi-, kalium- ja natriumarvoja ei käytetä muuttujina tässä tutkimuksessa.

Tässä tutkimuksessa ei oteta huomioon nitraattiasetuksen tai ympäristökorvauksen asettamia enimmäistypinmääriä. Sokerijuurikkaalle on nitraattiasetuksessa määritelty suurimmaksi typpilannoitustasoksi määritelty 170 kg/ha liukoista typpeä ja eloperäisillä mailla 130 kg/ha liukoista typpeä. Ympäristökorvauksessa typpilannoitustasot ovat tiukemmat ja perustuvat maan multavuuteen, sokerijuurikkaalle lannoitustaso on asetettu 140 kg/ha ja se on sama kaikissa multavuusluokissa. Eloperäisillä mailla lannoitustaso on 120 kg/ha. Sokerijuurikkaalla ei ole satotason perusteella mahdollista lisätä typpilannoitusta. Taloudellisesti optimaalinen typpilannoitustaso määritetään ilman ympäristökorvauksen aiheuttamaa rajoitetta, jonka jälkeen verrataan, onko määritetty optimilannoitustaso alle rajoitteen.

4 Tulokset

4.1 Tuotantofunktioiden estimointi ja vertailu

Tutkimuksessa tuotantofunktiot estimoitiin ensin typpiporraskoe aineistosta, ottamatta huomioon testipaikasta tai testivuodesta johtuvia eroja. Estimoinnissa havaittiin, että kaikissa tuotantofunktiomuodoissa selitysaste jäi hyvin alhaiseksi. Kvadraatti- ja neliöjuurifunktiossa selitysaste oli $R^2 = 0,06$ ja LRP-mallissa ja QRP-mallissa sekä Mitscherlich-funktiossa määritetty Nagelkerken pseudoselitysaste oli myös sama Nagelkerke $R^2 = 0,06$. Neliöjuurifunktion estimoinnissa huomattiin, että yksi funktion kertoimista ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Tämän takia neliöjuurifunktioon päätettiin lisätä myös toisen asteen termi. Tämän mallin perusteella tehdyssä estimoinnissa mikään funktion kertoimista ei ole merkitsevä, näin ollen mallin lannoitus-suosituksia ei voi pitää luotettavina. Estimoidut mallit on kuvattu liitteen 1 taulukoissa 1-6.

Studentin t-testin perusteella kvadraattifunktion parametrien estimaatit olivat tilastollisesti merkitseviä vähintään merkitsevyystasolla $\alpha=0,05$ eli 5 % riskillä. Neliöjuurifunktiossa neliöjuuritermi oli merkitsevä tasolla $\alpha=0,01$ eli 1 % riskillä, mutta ensimmäisen asteen termi ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Neliöjuurifunktio, johon oli lisätty toisen asteen termi, vain vakio termi oli tilastollisesti merkitsevä, mutta muut parametrien estimaatit eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. LRP-mallissa sekä QRP-mallissa kaikki parametrien estimaatit olivat tilastollisesti merkitseviä tasolla $\alpha=0,001$ eli 0,1 % riskillä. Mitscherlich-funktiossa parametrien estimaatit olivat tilastollisesti merkitseviä vähintään $\alpha=0,05$ eli 5 % riskillä.

F-testin avulla voidaan tarkastella mallin tilastollista merkitsevyyttä. Kvadraatti ja neliöjuurifunktion F-testin arvo oli merkitsevä tasolla $\alpha=0,001$. Tämän perusteella kumpikin malli soveltuu aineiston havainnointiin. F-testin arvoa ei määritetty LRP-mallissa ja QRP-mallissa eikä Mitscherlich-funktiossa.

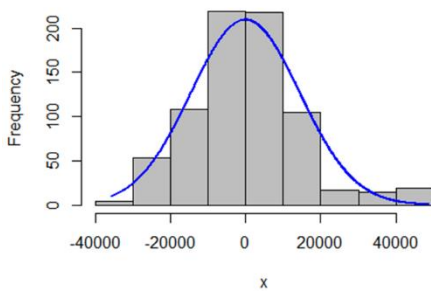
Heteroskedastisuutta testattiin Breuch-Pagan testin avulla. Nollahypoteesi H_0 on, että heteroskedastisuutta ei esiinny. Vaihtoehtoishypoteesi H_1 taas on, että malleissa esiintyy heteroskedastisuutta. Kvadraattifunktioon sekä neliöjuurifunktioon perustuvissa malleissa Breuch-Pagan testin arvo on merkitsevä, koska testin p-arvo on pieni $< 0,001$. Tämän perusteella voimme hylätä nollahypoteesin ja vaihtoehtoishypoteesi astuu voimaan. Tämän perusteella malleissa esiintyy

heteroskedastisuutta. Taulukossa 8 on estimoitujen funktioiden Breuch-Pagan testin tulokset ja niitä vastaavat p-arvot.

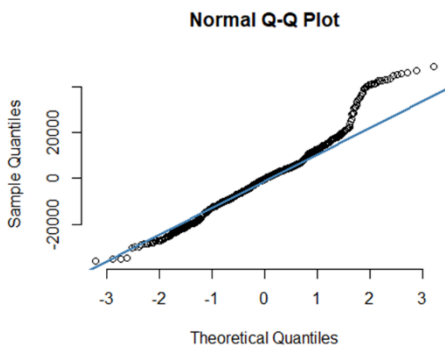
Taulukko 8. Breuch-Pagan testin tulokset ja p-arvot

Funktiomuoto	Breusch-Pagan testiarvo	p-arvo
Kvadraatti	13.828	0.000994
Neliöjuuri	12.561	0.001873
Neliöjuuri + toisen asteen termi	14.149	0.002709

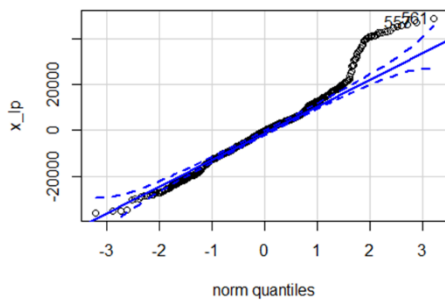
Mitscherlich-funktion estimoinnissa ei OLS- menetelmää voida käyttää, vaan sen sijasta käytetään MLE-menetelmää. Se perustuu selitettävän muuttujan Y todennäköisyysjakaumaan ja sen takia heteroskedastisuusongelmaa ei kyseisessä mallissa ole. LRP-mallissa residuaaleja tarkasteltiin graafisesti kuvien 7-9 avulla. Residuaalit seuraavat melko hyvin normaalijakaumaa. Isoissa satotasoissa on nähtävissä, että arvot ovat vaihteluvälin ulkopuolella, mutta LRP-mallissakaan ei heteroskedastisuusongelmaa ole. QRP-mallissa residuaalit seuraavat melko hyvin normaalijakaumaa, mutta myös QRP-mallissa isoilla satotasoilla on nähtävissä residuaalien erkanevan kauemmas. Heteroskedastisessa mallissa estimaatit ovat harhattomia, mutta t-testi ja F-testi eivät päde.



Kuvio 6. LRP-mallin residuaalit.



Kuvio 7. LRP- mallin standardisoitujen residuaalien teoreettisten ja otoksen kvantiilien vastaavuus.



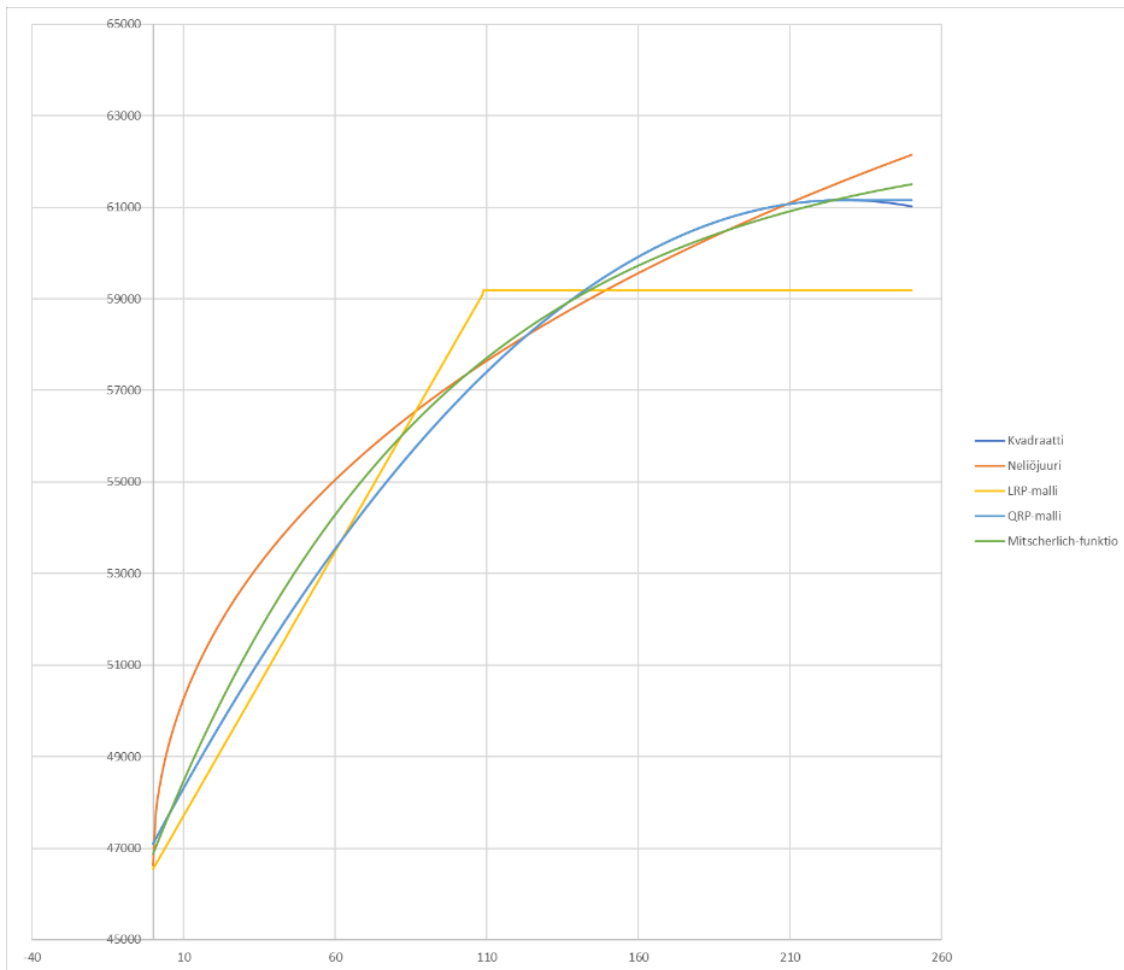
Kuvio 8. LRP-mallin residuaalien suhde normaalijakautumaan.

Autokorrelaatiota testattiin Breusch-Godfrey-testin avulla. Nollahypoteesi H_0 on, että autokorrelaatiota ei esiinny. Vaihtoehtoishypoteesi H_1 taas, että malleissa esiintyy autokorrelaatiota. Kvadraattifunktion malleissa ja neliöjuurifunktion molemmissa malleissa Breusch-Godfrey-testin tulos on merkitsevä, koska taulukossa 9 esitetyt p-arvot ovat pienet $<0,001$. Tämän takia nollahypoteesi hylätään ja vaihtoehtoishypoteesi astuu voimaan eli autokorrelaatiota esiintyy malleissa. Koska typpiporraskoe aineisto on mahdollista järjestää satunnaisesti estimointia varten, autokorrelaatio ei ole ongelma.

Taulukko 9. Breusch-Godfrey testin tulokset ja p-arvot.

Funktiomuoto	Breusch-Godfrey testiarvo	p-arvo
Kvadraatti	418.09	$< 2.2e-16$
Neliöjuuri	417.66	$< 2.2e-16$
Neliöjuuri + toisen asteen termi	417.35	$< 2.2e-16$

Kuvioon 9 on piirretty kaikkien estimoitujen funktioiden kuvaajat. Kuviosta voidaan nähdä, että kvadraattifunktion, neliöjuurifunktion, QRP-mallin ja Mitscherlich-funktion kuvaajissa ei ole suuria eroja, joten optimaalinen lannoitustaso näillä funktiomuodoilla on luultavasti lähellä toisiaan. LRP-mallin kuvaajan perusteella optimaalinen lannoitustaso on matalampi kuin edellä mainituissa funktioissa.



Kuvio 9. Kvadraattifunktion, neliöjuurifunktion, LRP-mallin, QRP-mallin ja Mitscherlich-funktion kuvaajat.

Estimoiduille malleille määritettiin myös selitysaste ja LRP-mallin sekä QRP-mallin ja Mitscherlich-funktion tapauksessa myös pseudoselitysaste, koska niille pienimmän neliösumman R^2 -selitysastetta ei voi määrittää. Aineiston yli estimoitujen mallien selitysasteet jäivät hyvin alhaisiksi ja olivat lähellä toisiaan. Bayesian information criterion (BIC) -testin avulla arvioitiin estimoituja malleja. BIC-testiarvon perusteella parhaiten kokonaisvaihtelua selittävä malli olisi neliöjuurimalli. Mitscherlich- ja kvadraattifunktion sekä QRP-malliin perustuvat funktiomuodot ovat seuraavaksi parhaiten selittävät mallit. Taulukosta 10 nähdään selitysasteet ja BIC-testin tulokset.

Taulukko 10. Eri funktiomuotojen selitysaste, pseudoselitysaste ja BIC-testiarvo

Funktioni	R ²	Nagelkerke R ²	BIC
Kvadraatti	0.06224	–	16743.05
Neliöjuuri	0.06399	–	16741.63
Neliöjuuri + toisen asteen termi	0.06471	–	16747.69
LRP	–	0.0593138	16745.42
QRP	–	0.0622437	16743.05
Mitscherlich	–	0.0632601	16742.23

Koska aineiston yli estimoitujen mallien selitysaste oli pieni, malleihin lisättiin mukaan dummy-muuttuja. Ensimmäisessä vaiheessa dummy-muuttujana oli testipaikka, toisessa vaiheessa testivuosi, kolmannessa vaiheessa testipaikka ja testivuosi ja neljännessä vaiheessa testipaikka, testivuosi ja jaettu typpilannoitus. Dummy-muuttujia lisäämällä pystyttiin huomioimaan testipaikan ja testivuoden vaikutusta sekä näiden yhteisvaikutusta estimoitaviin malleihin. Taulukossa 11 on selitysasteet ja pseudoselitysasteet eri funktiomuodoilla.

Taulukko 11. Eri funktiomuotojen selitysasteet ja pseudoselitysasteet sekä BIC-testiarvo, kun dummy-muuttuja on lisätty.

Funktioni	R ²	Nagelkerke R ²	BIC
Kvadraatti + paikka dummy-muuttuja	0.3279	–	16509.84
Kvadraatti + vuosi dummy-muuttuja	0.4666	–	16360.65
Kvadraatti + vuosi ja paikka dummy-muuttuja	0.6543	–	16051.05
Kvadraatti + vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja	0.6553	–	16055.36
Neliöjuuri + paikka dummy-muuttuja	0.3304	–	16506.96
Neliöjuuri + vuosi dummy-muuttuja	0.4658	–	16361.77
Neliöjuuri + vuosi ja paikka dummy-muuttuja	0.6535	–	16052.79
Neliöjuuri + vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja	0.6549	–	16056.25
Neliöjuuri + toisen asteen termi + paikka dummy-muuttuja	0.3321	–	16511.73
Neliöjuuri + toisen asteen termi + vuosi dummy-muuttuja	0.4667	–	16367.15
Neliöjuuri + toisen asteen termi + vuosi ja paikka dummy-muuttuja	0.6544	–	16057.49
Neliöjuuri + toisen asteen termi + vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja	0.6555	–	16061.68

Taulukko 11 jatkuu seuraavalla sivulla.

Taulukko 11 jatkuu.

Funktiomuoto	R ²	Nagelkerke R ²	BIC
LRP + paikka dummy-muuttuja	–	0.32755	16510.20
LRP + vuosi dummy-muuttuja	–	0.467972	16358.72
LRP + vuosi ja paikka dummy-muuttuja	–	0.655611	16048.08
LRP + vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja	–	0.656584	16052.56
QRP + paikka dummy-muuttuja	–	0.326803	16511.05
QRP + vuosi dummy-muuttuja	–	0.467254	16359.75
QRP + vuosi ja paikka dummy-muuttuja	–	0.654893	16049.66
QRP + vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja	–	0.655937	16053.99
Mitscherlich + paikka dummy-muuttuja	–	0.32956	16507.93
Mitscherlich + vuosi dummy-muuttuja	–	0.466163	16361.30
Mitscherlich + vuosi ja paikka dummy-muuttuja	–	0.653801	16052.06
Mitscherlich + vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja	–	0.655285	16055.43

Taulukosta 11 nähdään, että korkein selitysaste oli malleilla joissa oli mukana vuosi- ja paikka-dummy -muuttuja tai vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy -muuttuja. Kummassakin dummy-muuttuja vaihtoehdossa selitysaste ja pseudoselitysaste olivat hyvin lähellä toisiaan kaikilla eri tuotantofunktio muodoilla.

Eri funktiomuodoille tehtiin myös BIC-testi, testin perusteella parhaiten kokonaisvaihtelua selittävä malli olisi LRP-malli vuosi- ja paikka-dummy -muuttujilla. Toiseksi paras malli BIC-testin perusteella olisi QRP-malli vuosi- ja paikka-dummy -muuttujilla. Näiden jälkeen kvadraattifunktio ja Mitscherlich funktio vuosi- ja paikka-dummy-muuttujalla. Erot BIC-testiarvojen välillä eri funktiomuodoilla ovat hyvin pienet.

4.2 Taloudellisen optimin määrittäminen

Typpilannoituksen taloudellisen optimin määrittäminen aloitettiin määrittämällä biologisesti maksimi typpilannoitusmäärä. Tämä tehtiin määrittämällä tuotantofunktion derivaatan nollakohdat. Mitscherlich-funktiolle ei ole mahdollista määrittää biologisesti maksimi lannoitusmäärää. LRP- ja QRP-mallissa x_m määrittelee tason, tulostuksissa kerroin clx , jonka jälkeen typpilannoituksen lisääminen

ei enää vaikuta satotasoon. Biologisesti maksimi satotaso saatiin sijoittamalla edellä ratkaistu typpi-lannoitusmäärä tuotantofunktioon. Tulosten perusteella voidaan nähdä, että eri funktiomuodoille saadut tulokset eroavat melko paljon toisistaan. Suurimmat lannoitusmäärät ovat neliöjuurifunktiolla ja matalimmat lannoitustasot LRP-mallilla. Neliöjuurifunktiolle lasketut lannoitustasot eivät ole realistisella tasolla. Satotasojen kohdalla vaihteluväli ei ole niin iso.

Taulukko 12. Maksimi lannoitustasot ja satotasot eri funktiomuodoilla.

Funktiomuoto	N maks.	Maks. satotaso
Kvadraatti	227	61157
Kvadraatti + paikka-dummy-muuttuja	233	66456
Kvadraatti + vuosi-dummy-muuttuja	171	55010
Kvadraatti + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	171	64249
Kvadraatti + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	177	63922
Neliöjuuri	2071	73656
Neliöjuuri + paikka-dummy-muuttuja	901	70702
Neliöjuuri + vuosi-dummy-muuttuja	234	54650
Neliöjuuri + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	234	63889
Neliöjuuri + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	293	64088
LRP	109	59180
LRP + paikka-dummy-muuttuja	108	63934
LRP + vuosi-dummy-muuttuja	115	54408
LRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	115	63647
LRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	117	63317
QRP	227	61156
QRP + paikka-dummy-muuttuja	133	63889
QRP + vuosi-dummy-muuttuja	153	54394
QRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	153	63632
QRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	158	63350

Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso ratkaistiin määrittämällä piste, jossa rajakustannus ja rajatuotto ovat yhtä suuret. Taloudellisesti optimaalinen satotaso saatiin sijoittamalla taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso tuotantofunktioon. Taulukossa 13 on eri tuotantofunktioiden taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso ja sitä vastaava satotaso. Taulukon 13 tarkastelu on tehty käyttäen typpi-lannoitteena Belor Agron typpilannoitetta, jonka ALV 0 hinta 285 €/tn ja siitä laskettu typenhinta 1,05 €/kg. Sokerijuurikkaan hintana on käytetty 1 vuotisen sopimuksen perushintaa 26 €/tn.

Eri tuotantofunktioiden taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot eroavat jonkin verran. Alhaisimmat taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot ovat neliöjuurifunktiolla, kun siinä on mukana vuosi-

dummy-muuttuja tai vuosi- ja paikka-dummy-muuttujat. Vastaavasti korkein taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso on kvadraattifunktiolla, jossa on mukana paikka-dummy-muuttuja. LRP-mallissa on vain kaksi suositeltavaa lannoitustasoa. Nämä ovat 0 kg/ha tai eri LRP-muodoille tässä estimoidut lannoitustasot. Mikäli LRP-mallissa rajakustannus olisi isompi, kuin rajatuotto, typpilannoitusta ei kannattaisi tehdä. Tämän aineiston ja käytetyn sokerijuurikkaan kilohinnan perusteella LRP-mallissa eri funktiomuodoilla typen kilohinnan pitäisi olla yli 3,00-3,30 €/kg, jotta lannoitusta ei kannattaisi tehdä.

Taulukko 13. Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso, katetuotto ja satotaso, eri funktiomuodoilla.

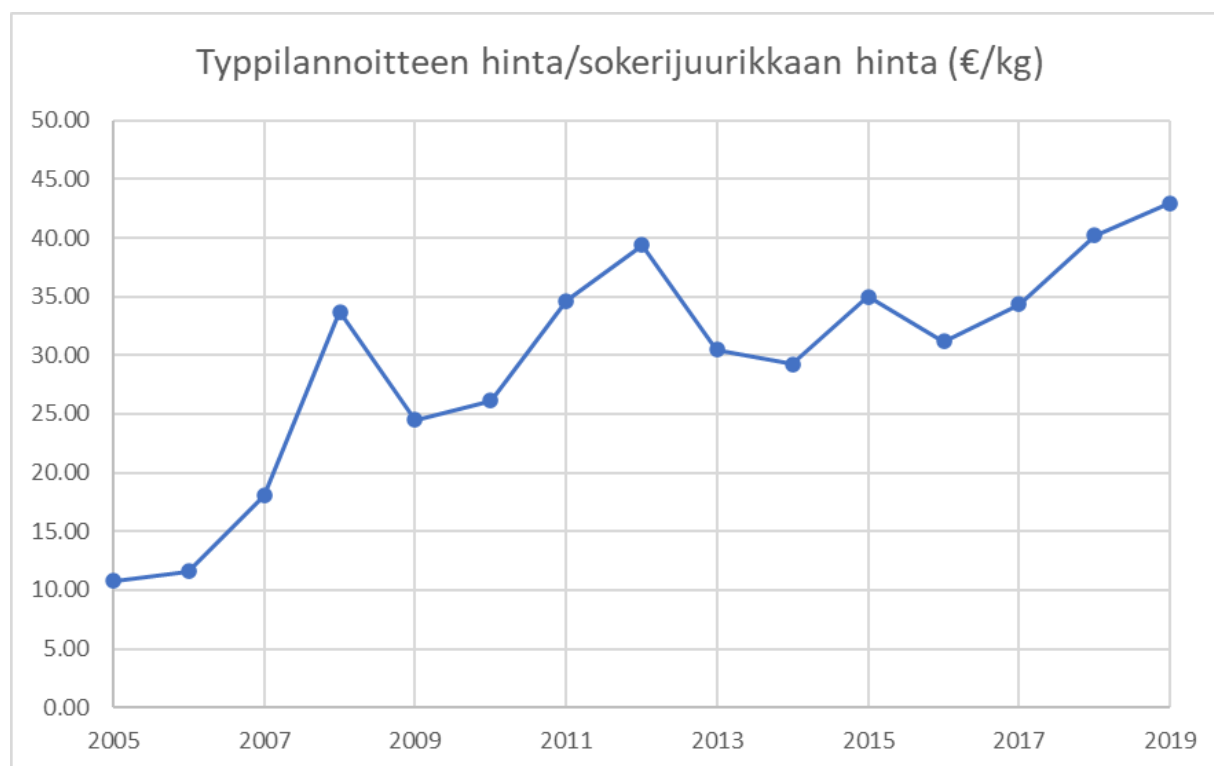
Funktio- muoto	N opt.	Katetuotto	Opt. sato- taso
Kvadraatti	154	1389	59673
Kvadraatti + paikka-dummy-muuttuja	157	1522	64920
Kvadraatti + vuosi-dummy-muuttuja	132	1270	54213
Kvadraatti + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	132	1510	63451
Kvadraatti + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	134	1498	63047
Neliöjuuri	125	1383	58258
Neliöjuuri + paikka-dummy-muuttuja	108	1509	62428
Neliöjuuri + vuosi-dummy-muuttuja	88	1270	52401
Neliöjuuri + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	88	1510	61640
Neliöjuuri + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	92	1493	61160
LRP	109	1423	59180
LRP + paikka-dummy-muuttuja	108	1548	63934
LRP + vuosi-dummy-muuttuja	115	1293	54408
LRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	115	1533	63647
LRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	117	1523	63317
QRP	154	1389	59672
QRP + paikka-dummy-muuttuja	105	1535	63309
QRP + vuosi-dummy-muuttuja	121	1270	53745
QRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	121	1510	62984
QRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	123	1499	62643
Mitscherlich	135	1387	58830
Mitscherlich + paikka-dummy-muuttuja	121	1512	63076
Mitscherlich + vuosi-dummy-muuttuja	104	1265	52893
Mitscherlich + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	104	1506	62133
Mitscherlich + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	110	1491	61788

Taulukossa 13 olevia taloudellisesti optimaalisia satotasojä verrattaessa huomataan, että dummy-muuttujien lisääminen nostaa satotasojä. Ainoastaan vuosi-dummy-muuttujää käytettäessä satotaso

jää ilman dummy-muuttujaa olevan funktiomuodon satotason alle. BIC-testin perusteella parhaiten kokonaisvaihtelua selittävien mallien optimaalista satotasoa verrattaessa huomataan, että LRP-mallissa vuosi- ja paikka-dummy-muuttujalla satotaso oli korkein.

Eri funktiomuotoja estimoitaessa ei ympäristökorvauksen asettamaa typpilannoitustasoa otettu huomioon. Sokerijuurikkaalle ympäristökorvauksessa on määritetty typpilannoitustasoksi elope-
räisillä mailla 120 kg/ha ja muilla multavuusluokilla 140 kg/ha. Estimoiduista funktio muodoista optimaalinen lannoitustaso ylitti 140 kg/ha vain kvadraattifunktiolla, QRP-mallilla ja paikka-dummy-muuttujalla olevalla kvadraattifunktiolla. Kaikissa muissa estimoiduissa funktiomuodoissa taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso jäi alle ympäristökorvauksen 140 kg/ha.

Seuraavaksi tarkasteltiin typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteen vaikutusta taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon. Kuviossa 10 on kuvattu typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteen vaihtelua vuosien 2005 ja 2019 välillä.



Kuvio 10. Typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhte vuosina 2005-2019.

Vertailuun valittiin vuosi 2019, jolloin suhteellinen ero on ollut suurin ja 2006 jolloin suhteellinen ero oli pienin sekä vuodet 2014 ja 2010. Taulukosta 14 nähdään taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot vuosien 2009, 2014 ja 2019 typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteilla. Tuloksista nähdään, että neliöjuurifunktiolla sekä neliöjuurifunktiolla, jossa on mukana paikka-dummy-muuttuja vuoden 2006 taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso on hyvin korkea ja ei näin ollen ole realistisella tasolla.

Taulukko 14. Estimoitujen mallien taloudellisesti optimaaliset typpilannoitustasot vuosien 2006, 2010, 2014 ja 2019 typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteilla.

Funktio	Taloudellisesti optimaalinen lannoitus			
	v. 2006 kg/ha	v. 2010 kg/ha	v. 2014 kg/ha	v. 2019 kg/ha
Kvadraatti	206	179	174	148
Kvadraatti + paikka-dummy-muuttuja	211	184	178	153
Kvadraatti + vuosi-dummy-muuttuja	160	146	143	130
Kvadraatti + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	160	146	143	130
Kvadraatti + vuosi-, paikka- ja jaettu-lannoitus-dummy-muuttuja	165	150	146	132
Neliöjuuri	580	230	197	112
Neliöjuuri + paikka-dummy-muuttuja	379	183	161	100
Neliöjuuri + vuosi-dummy-muuttuja	168	118	110	84
Neliöjuuri + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	168	118	110	84
Neliöjuuri + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	196	130	120	88
LRP	109	109	109	109
LRP + paikka-dummy-muuttuja	108	108	108	108
LRP + vuosi-dummy-muuttuja	115	115	115	115
LRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	115	115	115	115
LRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	117	117	117	117
QRP	206	179	174	148
QRP + paikka-dummy-muuttuja	125	115	113	103
QRP + vuosi-dummy-muuttuja	143	132	129	119
QRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	143	132	129	119
QRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	148	135	133	121
Mitscherlich	252	176	165	129
Mitscherlich + paikka-dummy-muuttuja	220	156	147	117
Mitscherlich + vuosi-dummy-muuttuja	170	127	121	101
Mitscherlich + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	170	127	121	101
Mitscherlich + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	184	136	129	106

LRP-mallissa on vain kaksi lannoitustasoa eli lannoitusta eli 0 kg/ha ja tutkimuksessa estimoidut lannoitustasot. Lannoituksen kannattavuuteen LRP-mallissa vaikuttaa typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhte. Jos rajakustannus ylittää rajatuoton, ei lannoitusta kannata tehdä. Tarkasteltujen vuosien typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteilla lannoitus oli kannattavaa jokaisena tarkastelu vuotena. Neliöjuurifunktiolla sekä Mitscherlich-funktiolla hintasuhteen vaikutus taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon on suurempi, kuin kvadraattifunktioon ja QRP-malliin perustuvilla malleilla.

Taloudellisesti optimaalisen lannoituksen perusteella laskettu katetuotto, kun otetaan huomioon tarkastelu vuosien typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhte on kuvattu taulukossa 15. Kaikissa eri funktiomuodoissa katetuotot vertailuvuosien sisällä ovat hyvin lähellä toisiaan. Alhaisin katetuotto on malleilla, joissa on mukana vuosi-dummy-muuttuja. LRP-malliin perustuvissa funktiomuodoissa katetuotto oli yleisesti korkein. Ainoastaan vuoden 2006 hintasuhteella neliöjuurifunktion ja neliöjuurifunktio paikka-dummy-muuttujalla katetuotto oli LRP-mallin vastaavia funktiomuotoja korkeampi, mutta näissä tapauksissa taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot 580 kg/ha ja 379 kg/ha eivät ole realistisia.

Taulukko 15. Sokerijuurikkaan taloudellisesti optimaalisen lannoituksen katetuotto, kun otetaan huomioon tarkastelu vuosien typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhte.

Funktioimuoto	Taloudellisesti optimaalisen lannoituksen katetuotto			
	v. 2006 €	v. 2010 €	v. 2014 €	v. 2019 €
Kvadraatti	2957	1659	2209	1363
Kvadraatti + paikka-dummy-muuttuja	3221	1813	2414	1493
Kvadraatti + vuosi-dummy-muuttuja-muuttuja	2677	1511	2014	1246
Kvadraatti + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3143	1786	2383	1483
Kvadraatti + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3123	1773	2364	1470
Neliöjuuri	3072	1653	2196	1358
Neliöjuuri + paikka-dummy-muuttuja	3223	1786	2379	1484
Neliöjuuri + vuosi-dummy-muuttuja	2640	1495	1995	1248
Neliöjuuri + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3106	1770	2364	1485
Neliöjuuri + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3091	1753	2341	1468
LRP	2920	1674	2236	1398
LRP + paikka-dummy-muuttuja	3161	1816	2428	1522
LRP + vuosi-dummy-muuttuja	2676	1527	2038	1269
LRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3142	1802	2407	1506
LRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3124	1791	2393	1497

Taulukko 15 jatkuu seuraavalla sivulla.

Taulukko 15 jatkuu.

Funktio­muoto	Taloudellisesti optimaalisen lannoituksen katetuotto			
	v. 2006 €	v. 2010 €	v. 2014 €	v. 2019 €
QRP	2957	1659	2208	1363
QRP + paikka-dummy-muuttuja	3146	1802	2408	1509
QRP + vuosi-dummy-muuttuja	2656	1506	2008	1247
QRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3122	1780	2377	1484
QRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3105	1769	2361	1472
Mitscherlich	2955	1651	2198	1361
Mitscherlich + paikka-dummy-muuttuja	3167	1787	2383	1485
Mitscherlich + vuosi-dummy-muuttuja	2645	1496	1995	1243
Mitscherlich + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3111	1770	2364	1480
Mitscherlich + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3095	1756	2344	1465

Estimoinnissa ei otettu huomioon ympäristökorvauksen asettamia typpilannoitus rajoitteita, eloperäisillä mailla 120 kg/ha ja muilla multavuusluokilla 140 kg/ha. Tarkastellaan seuraavaksi, mikä vaikutus ympäristökorvauksen asettamilla rajoitteilla on katetuottoon. LRP-mallin osalta kummatkin ympäristökorvauksen lannoiterajat ovat suuremmat, kuin LRP-mallin eri funktio­muotojen maksimi lannoitustasot. Myöskin QRP-malli paikka-dummy-muuttujalla lannoitustaso jää alle ympäristökorvauksen 140 kg/ha lannoitusrajan. Vuosien 2010, 2014 ja 2019 typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteella lasketut taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot olivat useassa funktio­muodossa matalammat kuin ympäristökorvauksen sallimat typpilannoitustasot. Seuraavan sivun taulukossa 16 on kuvattuna katetuoton muutos, jos lannoitettaisiin ympäristökorvauksen rajoitteen mukaan. Suluissa ympäristökorvauksen huomioimisesta aiheutuva vähennys katetuottoon.

Taulukko 16. Ympäristökorvauksen 120 kg/ha ja 140 kg/ha typpirajoitteen huomioon ottamisen vaikutus katetuottoon.

Funktioimuoto	v. 2006 €		v. 2010 €		v. 2014 €		v. 2019 €	
	120 kg/ha	140 kg/ha	120 kg/ha	140 kg/ha	120 kg/ha	140 kg/ha	120 kg/ha	140 kg/ha
Kvadraatti	2855 (-102)	2897 (-60)	1631 (-28)	1647 (-13)	2177 (-31)	2196 (-12)	1357 (-6)	1362 (0)
Kvadraatti + paikka-dummy-muuttuja	3109 (-112)	3153 (-68)	1780 (-33)	1798 (-15)	2378 (-36)	2399 (-16)	1486 (-7)	1492 (-1)
Kvadraatti + vuosi-dummy-muuttuja	2635 (-42)	2666 (-11)	1501 (-10)	1511 (-1)	2003 (-11)	2014 (0)	1245 (-1)	1245 (-1)
Kvadraatti + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3101 (-42)	3132 (-11)	1776 (-10)	1785 (-1)	2372 (-11)	2383 (0)	1482 (-1)	1482 (-1)
Kvadraatti + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3075 (-48)	3108 (-15)	1760 (-12)	1771 (-1)	2351 (-13)	2363 (-1)	1469 (-2)	1469 (-1)
Neliöjuuri	2858 (-214)	2886 (-187)	1633 (-21)	1640 (-13)	2179 (-16)	2187 (-8)	1358 (0)	1356 (-2)
Neliöjuuri + paikka-dummy-muuttuja	3102 (-121)	3125 (-97)	1776 (-9)	1782 (-4)	2373 (-6)	2377 (-2)	1482 (-2)	1478 (-6)
Neliöjuuri + vuosi-dummy-muuttuja	2625 (-15)	2635 (-5)	1495 (0)	1493 (-2)	1995 (-1)	1989 (-7)	1239 (-9)	1229 (-20)
Neliöjuuri + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3090 (-15)	3101 (-5)	1770 (0)	1767 (-2)	2364 (-1)	2358 (-7)	1477 (-9)	1466 (-20)
Neliöjuuri + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3062 (-29)	3077 (-15)	1753 (0)	1753 (0)	2341 (0)	2338 (-3)	1462 (-6)	1453 (-15)
QRP	2855 (-102)	2897 (-60)	1631 (-28)	1647 (-12)	2177 (-31)	2196 (-12)	1357 (-6)	1362 (0)
QRP + paikka-dummy-muuttuja	3145 (-1)		1802 (-1)		2407 (-1)		1504 (-5)	
QRP + vuosi-dummy-muuttuja	2639 (-18)	2656 (0)	1503 (-3)	1505 (-1)	2006 (-2)	2005 (-3)	1247 (0)	1239 (-7)
QRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3104 (-18)	3122 (0)	1778 (-3)	1779 (-1)	2375 (-2)	2374 (-3)	1484 (0)	1476 (-7)
QRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3082 (-23)	3103 (-2)	1765 (-4)	1768 (0)	2357 (-4)	2360 (-1)	1472 (0)	1467 (-5)
Mitscherlich	2862 (-92)	2894 (-61)	1635 (-16)	1645 (-6)	2183 (-15)	2194 (-4)	1361 (0)	1360 (-1)
Mitscherlich + paikka-dummy-muuttuja	3107 (-60)	3133 (-35)	1780 (-8)	1786 (-1)	2377 (-6)	2383 (0)	1485 (0)	1482 (-3)
Mitscherlich + vuosi-dummy-muuttuja	2625 (-20)	2638 (-6)	1495 (0)	1495 (-1)	1995 (0)	1991 (-3)	1240 (-3)	1230 (-13)
Mitscherlich + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	3091 (-20)	3104 (-6)	1770 (0)	1769 (-1)	2364 (0)	2360 (-3)	1477 (-3)	1468 (-13)
Mitscherlich + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	3065 (-30)	3082 (-12)	1754 (-2)	1756 (0)	2343 (-1)	2343 (-1)	1463 (-2)	1456 (-9)

4.3 Sokeripitoisuuslisän vaikutus taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon

Viljelijälle maksetaan lisähintaa sokerijuurikkaan sokeripitoisuuden perusteella. Sokerijuurikkaan perushinta vastaa 16 % sokeripitoisuutta. Sokeripitoisuuden ylittäessä 16 % viljelijälle maksetaan lisähintaa 0,9 % perushinnasta, jokaisen 0,1 % sokeripitoisuusyksikön lisäyksen osalta. Typpilannoituksella on vaikutusta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen, tämän vuoksi estimoituihin funktio typpilannoituksen vaikutuksesta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen.

Funktiomuotoina estimoinnissa käytettiin lineaarista funktiota sekä kvadraatti- ja neliöjuurifunktiota. Selitysaste estimoiduissa malleissa oli hyvin matala. Kvadraattifunktiolla selitysaste oli korkein (0,027) ja matalin lineaarifunktiolla (0,016), neliöjuurifunktiolla selitysaste (0,026) oli hyvin lähellä kvadraattifunktion selitystasoa. Lineaarifunktiossa estimoidut kertoimet, olivat merkitseviä merkitsevyystasolla $\alpha=0,001$ eli 0,1 % riskillä. Kvadraattifunktioon perustuvassa mallissa β_1 -kerroin oli merkitsevä 0,11 tasolla eli 11 % riskillä, muut kertoimet olivat merkitseviä vähintään merkitsevyystasolla $\alpha=0,01$ eli 1 % riskillä. Neliöjuurifunktioon perustuvassa mallissa kertoimet olivat merkitseviä vähintään merkitsevyystasolla $\alpha=0,01$ eli 1 % riskillä. Taulukossa 17 on estimoitujen funktioiden kertoimet sekä funktioiden selitysasteet.

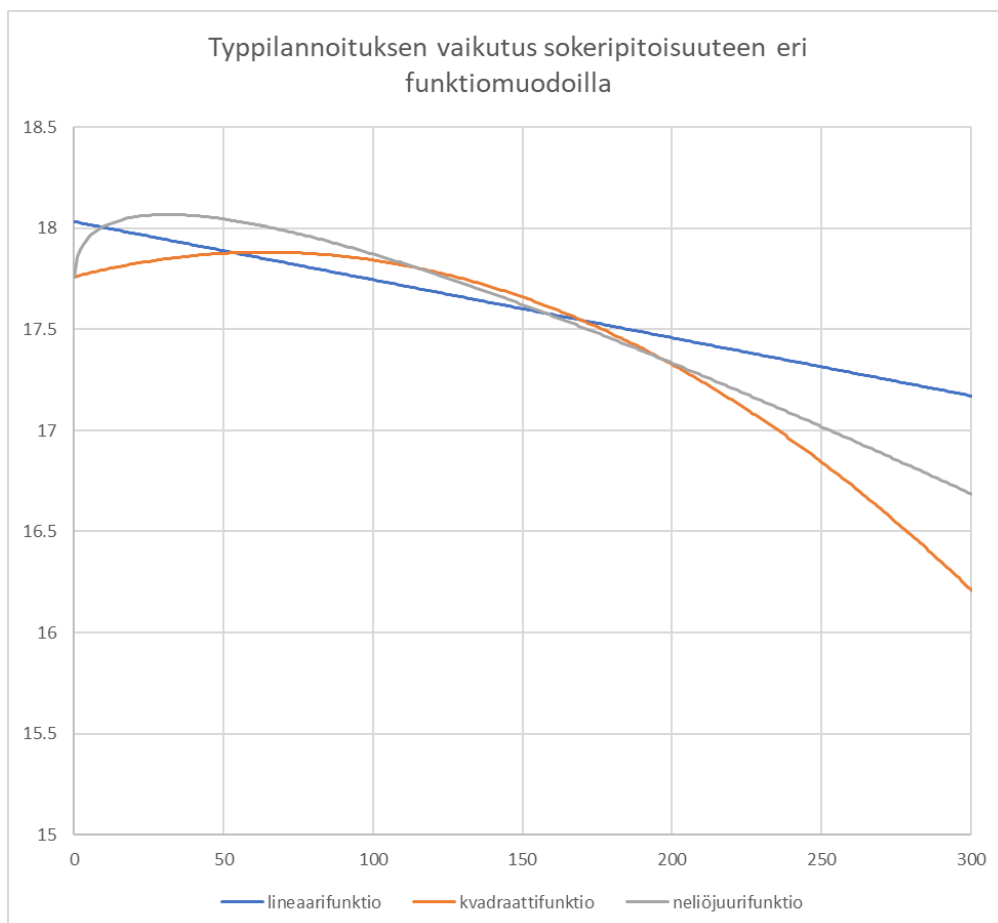
Taulukko 17. Estimoidut funktiot typpilannoituksen vaikutuksesta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen selitysasteineen.

	Lineaarinen funktio: $y = \beta_0 + \beta_1 x$	Kvadraattifunktio: $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$	Neliöjuurifunktio: $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 \sqrt{x}$
β_0	18.0329 (***)	17.76 (***)	17.756 (***)
β_1	-0.00287 (***)	0.00383 ()	0.1119 (**)
β_2		-0.00002994 (**)	-0.010023 (***)
R^2	0.01554	0.02683	0.02589
BIC	2549.661	2547.530	2548.261

Kertoimien merkitsevyys: 0 '***' 0.001, '**' 0.01, '*' 0.05, '.' 0.1, ' ' 1

Funktioista ratkaistiin typpilannoitustaso, jossa sokeripitoisuus on 16 %. Estimoitujen mallien perusteella lineaari-, kvadraatti- ja neliöjuurifunktiolla typpilannoitustaso, jossa sokeripitoisuus laski alle 16 %, oli hyvin korkea. Lineaarifunktiolla typpilannoitustaso oli 677 kg/ha, kvadraattifunktiolla 314 kg/ha ja neliöjuurifunktiolla 397 kg/ha. Lasketut lannoitustasot ylittävät ympäristökorvauksen sekä

nitraattiasetuksen typpilannoitukselle asettamat ylärajat sekä typpiporraskokeissa käytetyn suurimman typpilannoitustason 220 kg/ha. Typpilannoitus ei näin ollen rajoittaisi taloudellisesti optimaalista lannoitustasoa, kun otetaan huomioon sokerijuurikkaan sokeripitoisuus. Kuviossa 11 on esitetty typpilannoituksen vaikutus sokeripitoisuuteen eri funktiomuodoilla.



Kuvio 11. Typpilannoituksen vaikutus sokeripitoisuuteen eri funktiomuodoilla.

Sokeripitoisuuslisän vaikutus taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon laskettiin Excel-taulukolaskentaohjelman avulla. Kvadraattifunktiota käytettiin funktiomuotona laskettaessa typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen. Taulukossa 18 on esitettynä eri funktiomuotojen taloudellisesti optimaalinen typpilannoitustaso, katetuotto ja juurisato.

Taulukko 18. Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso, katetuotto ja juurisato, kun otetaan huomioon sokeripitoisuuslisä kvadraattifunktiona.

Funktiomuoto	N opt.	Katetuotto	Juurisato
Kvadraatti	123	1625	58192
Kvadraatti + paikka-dummy-muuttuja	131	1778	63678
Kvadraatti + vuosi-dummy-muuttuja-muuttuja	123	1493	53804
Kvadraatti + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	121	1772	62941
Kvadraatti + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	122	1756	62478
Neliöjuuri	103	1629	57339
Neliöjuuri + paikka dummy-muuttuja	96	1777	61933
Neliöjuuri + vuosi dummy-muuttuja	88	1498	52408
Neliöjuuri + vuosi ja paikka dummy-muuttuja	87	1779	61605
Neliöjuuri + vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja	90	1759	61067
LRP	109	1675	59180
LRP + paikka-dummy-muuttuja	108	1821	63934
LRP + vuosi-dummy-muuttuja	115	1522	54408
LRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	115	1801	63647
LRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	117	1790	63317
QRP	130	1626	58576
QRP + paikka-dummy-muuttuja	101	1807	63140
QRP + vuosi-dummy-muuttuja	115	1495	53500
QRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	114	1775	62690
QRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	115	1761	62288
Mitscherlich	116	1629	57993
Mitscherlich + paikka-dummy-muuttuja	108	1777	62484
Mitscherlich + vuosi-dummy-muuttuja	100	1493	52720
Mitscherlich + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	99	1773	61915
Mitscherlich + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	103	1755	61499

Verrattaessa taulukossa 18 olevia taloudellisesti optimaalisia lannoitustasoja taulukossa 13 oleviin taloudellisesti optimaalisiin lannoitustasoihin. Huomataan, että sokeripitoisuuden huomioiminen on laskenut lannoitustasoja kaikilla funktiomuodoilla paitsi LRP-mallissa. Lannoitustaso alenee 0-31 kg/ha riippuen funktiomuodosta. Katetuotto vastaavasti oli 223-273 € korkeampi riippuen funktiomuodosta, kun otetaan huomioon myös sokeripitoisuuslisä.

Dummy-muuttujien vaikutus testattiin, koska typpiporraskoe aineiston yli estimoiduissa typpilannoituksen vaikutuksesta sokeripitoisuuteen malleissa, selitysaste oli hyvin alhainen. Dummy-muuttujina käytettiin testipaikka-, testivuosi-, testipaikka- ja testivuosi- sekä testipaikka-, testivuosi- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttujia. Dummy-muuttujien lisäämisellä oli vaikutusta selitysasteeseen. Korkein selitysaste oli malleilla, joissa käytössä oli paikka- ja vuosi-dummy-muuttujat. Neliöjuurifunktiolla selitysaste oli korkein (0,8078) ja matalin lineaarifunktiolla (0,8056). Kvadraattifunktiolla selitysaste (0,8076) oli hyvin lähellä neliöjuurifunktion selitystasetta. Lineaarifunktiossa estimoidut kertoimet, olivat merkitseviä merkitsevyystasolla $\alpha=0,001$ eli 0,1 % riskillä. Kvadraattifunktioon perustuvassa mallissa β_1 -kerroin oli merkitsevä 0,85 tasolla eli 85 % riskillä, muut kertoimet olivat merkitseviä vähintään merkitsevyystasolla $\alpha=0,01$ eli 1 % riskillä. Neliöjuurifunktioon perustuvassa mallissa kertoimet olivat merkitseviä vähintään merkitsevyystasolla $\alpha=0,01$ eli 1 % riskillä. Dummy-muuttujat olivat kaikissa funktiomuodoissa merkitseviä merkitsevyystasolla $\alpha=0,001$ eli 0,1 % riskillä. Taulukossa 19 on estimoitujen funktioiden kertoimet sekä funktioiden selitysasteet.

Taulukko 19. Estimoidut funktiot typpilannoituksen vaikutuksesta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen selitysasteineen, kun mukana on paikka- ja vuosi-dummy-muuttujat.

	Lineaarinen funktio: $y = \beta_0 + \beta_1 x$	Kvadraattifunktio: $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$	Neliöjuurifunktio: $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 \sqrt{x}$
β_0	17.956 (***)	17.83 (***)	17.818 (***)
β_1	-0.00283 (***)	0.00021 ()	0.055 (**)
β_2		-0.00001356 (**)	-0.0063 (***)
D2014	-1.9505 (***)	-1.937 (***)	-1.9369 (***)
D2015	-0.9576 (***)	-0.9585 (***)	-0.9596 (***)
D2016	1.9022 (***)	1.904 (***)	1.9045 (***)
D2017	-0.9292 (***)	-0.9274 (***)	-0.9269 (***)
D2018	-1.1102 (***)	-1.088 (***)	-1.0872 (***)
D2019	-1.5671 (***)	-1.545 (***)	-1.5441 (***)
D2020	0.6255 (***)	0.6082 (***)	0.6179 (***)
DTP1	-0.7862 (***)	-0.7862 (***)	-0.7862 (***)

Taulukko 19 jatkuu seuraavalla sivulla.

Taulukko 19 jatkuu.

DTP2	1.4434 (***)	1.443 (***)	1.4434 (***)
DTP3	0.4333 (***)	0.4333 (***)	0.4333 (***)
R^2	0.8056	0.8076	0.8078
BIC	1372.147	1369.864	1368.950

Kertoimien merkitsevyys: 0 '****' 0.001, '***' 0.01, '**' 0.05, '.' 0.1, ' ' 1

Sokeripitoisuuden vaikutus taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon laskettiin neliöjuurifunktion avulla, koska siinä selitysaste oli korkein sekä BIC-testisuure alhaisin. Taulukossa 20 on esitettyä eri funktiomuotojen taloudellisesti optimaalinen typpilannoitustaso, katetuotto ja juurisato.

Taulukko 20. Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso, katetuotto ja juurisato, kun otetaan huomioon sokeripitoisuuslisä neliöjuurifunktiona.

Funktioimuoto	N opt.	Kate- tuotto	Juurisato
Kvadraatti	129	1608	58523
Kvadraatti + paikka-dummy-muuttuja	130	1758	63623
Kvadraatti + vuosi-dummy-muuttuja-muuttuja	121	1477	53702
Kvadraatti + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	119	1753	62835
Kvadraatti + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	120	1737	62372
Neliöjuuri	89	1615	56673
Neliöjuuri + paikka dummy-muuttuja	80	1764	61177
Neliöjuuri + vuosi dummy-muuttuja	77	1489	51923
Neliöjuuri + vuosi ja paikka dummy-muuttuja	75	1768	61065
Neliöjuuri + vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja	76	1748	60427
LRP	109	1659	59180
LRP + paikka-dummy-muuttuja	108	1804	63934
LRP + vuosi-dummy-muuttuja	115	1506	54408
LRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	115	1783	63647
LRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	117	1771	63317
QRP	129	1608	58523
QRP + paikka-dummy-muuttuja	97	1791	62944
QRP + vuosi-dummy-muuttuja	112	1480	53351
QRP + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	110	1757	62484
QRP + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	112	1743	62134

Taulukko 20 jatkuu seuraavalla sivulla.

Taulukko 20 jatkuu.

Funktiomuoto	N opt.	Kate- tuotto	Juurisato
Mitscherlich	111	1612	57714
Mitscherlich + paikka-dummy-muuttuja	101	1760	62132
Mitscherlich + vuosi-dummy-muuttuja	94	1480	52441
Mitscherlich + vuosi- ja paikka-dummy-muuttuja	91	1758	61529
Mitscherlich + vuosi-, paikka- ja jaettu lannoitus-dummy-muuttuja	95	1739	61110

Verrattaessa taulukossa 20 olevia taloudellisesti optimaalisia lannoitustasoja taulukossa 13 oleviin taloudellisesti optimaalisiin lannoitustasoihin. Huomataan, että sokeripitoisuuden huomioiminen on laskenut lannoitustasoja kaikilla funktiomuodoilla paitsi LRP-mallissa. Lannoitustaso alenee 0-36 kg/ha riippuen funktiomuodosta. Katetuotto vastaavasti oli 206-259 € korkeampi riippuen funktiomuodosta, kun otetaan huomioon myös sokeripitoisuuslisä.

5 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa tarkasteltiin kvadraattifunktioon, neliöjuurifunktioon, Mitscherlich-funktioon sekä LRP- ja QRP-malliin perustuvia malleja. Maksimilannoitustasoa määritettäessä huomattiin, että neliöjuurifunktioon perustuvat mallit antoivat hyvin korkeita lannoitussuosituksia. Tämän vuoksi neliöjuurifunktioon lisättiin mukaan myös toisen asteen termi. Tämän mallin perusteella tehdyssä estimoinnissa mikään funktion termeistä ei ollut merkitsevä, joten lannoitussuosituksia ei voi pitää luotettavina ja pitäydyttiin käyttämään alkuperäistä neliöjuurifunktiota estimoinneissa.

Estimoitujen mallien heteroskedastisuutta tutkittiin Breuch-Pagan testin avulla. Heteroskedastisuutta esiintyi kaikilla muilla malleilla paitsi LRP- ja QRP- mallissa sekä Mitscherlich- funktioon perustavassa mallissa. Koska malleissa oli heteroskedastisuutta, estimoinnissa olisi voinut käyttää OLS-menetelmä sijasta WLS (weighted least squares) menetelmää (Asteriou & Hall, 2016, 148-149). OLS-menetelmällä tutkimuksessa estimoidut kertoimet ovat kuitenkin harhattomia, mutta t-testin ja F-testin tulokset eivät päde.

Tutkimuksessa estimoitujen mallien paremmuutta verrattiin BIC-testisuureen sekä selitystasteen ja Nagelkerke pseudoselitystasteen avulla. Estimoiduista malleista parhaiten sokerijuurikkaan typpilannoituksen satovastetta kuvasi neliöjuurifunktio. Toiseksi parhain malli oli Mitscherlich-funktioon perustuva malli. Selitystasteessa ja BIC-testisuureessa erot näiden kahden mallin välillä olivat hyvin pienet. Mallit estimoitiin myös lisäämällä funktiomuotoihin dummy-muuttujat. Dummy muuttujina käytettiin paikka- ja vuosi-dummy-muuttujia sekä näiden yhdistelmää ja lisäksi jaettu lannoitus dummy- muuttujaa yhdessä paikka- ja vuosi-dummy-muuttujan kanssa. Paikka-dummy-muuttujan lisääminen nosti selitystastetta kaikissa funktiomuodoissa ja laski BIC-testisuureen arvoa. Samoin tapahtui myös vuosi-dummy-muuttujan kohdalla. Korkeimmat selitystasteet saatiin funktiomuodoilla, joissa oli mukana paikka-, vuosi- ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja. Funktiomuodoilla, joissa oli mukana paikka- ja vuosi-dummy-muuttuja, selitystaste oli hyvin lähellä edellä mainittua. BIC-testisuureen arvo oli kuitenkin pienin funktiomuodoilla, joissa oli mukana paikka- ja vuosi-dummy-muuttuja. BIC-testisuureen perusteella parhaiten sokerijuurikkaan typpilannoituksen vastetta kuvasi LRP-malli paikka- ja vuosi-dummy-muuttujalla. Toiseksi paras malli oli kvadraattifunktio paikka- ja vuosi-dummy-muuttujalla ja kolmanneksi paras malli Mitscherlich-funktio paikka- ja vuosi-dummy-muuttujalla. Näissä malleissa selitystasteen ja BIC-testisuureen erot olivat hyvin pienet.

Jaggard, Ql ja Armstrong (2009, 287-301) olivat omassa tutkimuksessaan käyttäneet bilineaarista funktiota tasanteella, eksponenttifunktiota (Mitscherlich-funktio) sekä eksponenttifunktiota, johon oli lisätty lineaarifunktio, tutkiessaan typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan satovasteeseen. He päätyivät omassa tutkimuksessaan johtopäätökseen, että bilineaarinen malli tasanteella oli yksinkertainen ja useimmissa tapauksissa kuvasi satovasteen parhaiten. Bilineaarinen malli tasanteella antaa heti optimaalisen typpilannoitustason, jolla saavutetaan maksimisatotaso. Mallin ominaisuutena on, että se antaa alemman optimilannoitustason kuin Mitscherlich-funktio. Tässä tutkimuksessa optimilannoitustasot olivat LRP-mallissa ja Mitscherlich-funktiossa lähellä toisiaan. Kun funktiomuotoon lisättiin vuosi, paikka- ja vuosi- tai paikka-, vuosi- ja jaettu lannoitus dummy-muuttujat, Mitscherlich funktion lannoitustasot olivat alemmat kuin LRP-funktion.

Sayili ja Akca (2004, 529-531) vertailivat omassa tutkimuksessaan yhdeksää eri mallia, tutkiessaan typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan satovasteeseen. He olivat valinneet tutkimukseensa lineaarifunktion, kvadraattifunktion, neliöjuurifunktion, logaritmifunktion (log-log), semi-logaritmifunktion (lin-log), semi-logaritmifunktion (log-lin), kolmannen asteen funktion, Cobb-Douglas-funktion sekä käänteislukufunktion. Malleja vertailtiin toisiinsa selityksasteen ja keskivirheen avulla. He päätyivät omassa tutkimuksessaan johtopäätökseen, että kvadraattifunktio selitti parhaiten satovastetta. Tässä tutkimuksessa kvadraattifunktio oli BIC-testisuureen ja selityksasteen perusteella toiseksi paras malli LRP-funktion jälkeen, kun estimoinnissa oli mukana vuosi- ja paikka- dummy-muuttujat. Optimaalinen typpilannoitustaso oli kvadraattifunktiolla 17 kg/ha korkeampi ja katetuotto oli 23 € alhaisempi, kuin LRP-funktiolla.

Sokerijuurikkaalle ei ole määritelty satotasoon perustuvia typpilannoitustasoja, vaan typpilannoitteiden käyttöä rajoitetaan nitraattiasetuksen tai ympäristökorvauksen typpilannoitusrajojen perusteella. Nitraattiasetuksen liukoisen typen lannoitusrajat ovat kivennäismaille 170 kg/ha ja eloperäisille maille 130 kg/ha, ympäristökorvauksen vastaavat typpilannoitusrajat ovat 140 kg/ha ja 120 kg/ha. Tutkimuksessa määritetyt taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot vaihtelivat 88-154 kg/ha välillä riippuen funktiomuodosta. Funktiomuodoista vain kvadraatti- ja kvadraattifunktiossa paikka-dummy-muuttujalla sekä QRP-mallissa lannoitustaso ylitti 140 kg/ha kaikissa muissa funktiomuodoissa jäätin ympäristökorvauksen 140 kg/ha rajan alle. Eloperäisille maille määritetyn 120 kg/ha lannoitusrajan alitti LRP-malli ja sen eri dummy-muuttuja funktiomuodot, neliöjuurifunktio eri dummy-muuttuja vaihtoehdoilla sekä Mitscherlich-funktio vuosi, paikka- ja vuosi- sekä paikka-,

vuosi- ja jaettu lannoitus dummy-muuttuja funktiomuodoilla. Näin ollen suurimmassa osassa funktiomuodoista, ympäristökorvauksen typpilannoitusrajat eivät rajoita taloudellisesti optimaalista lannoitustasoa.

Tutkimuksessa tutkittiin myös typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteen vaikutusta taloudellisesti optimaaliseen lannoitukseen. Vertailuvuosiksi valittiin vuodet 2006, 2010, 2014 ja 2019. Hintasuhteen vaikutus taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon oli suurempi neliöjuurifunktiolla ja Mitscherlich-funktiolla, kuin kvadraattifunktioon ja QRP-malliin perustuvissa funktiomuodoissa. LRP-mallissa on vain kaksi lannoitustasoa ei lannoitusta eli 0 kg/ha ja tutkimuksessa estimoidut lannoitustasot. Lannoituksen kannattavuuteen LRP-mallissa vaikuttaa typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhte. Jos rajakustannus ylittää rajatuoton, ei lannoitusta kannata tehdä. Tällä perusteella tarkasteluvuosien typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteilla, lannoitus oli kannattavaa jokaisena tarkasteluvuotena. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös, mikä vaikutus eri hintasuhteilla lasketuilla taloudellisesti optimaalisilla lannoitustasoilla on katetuottoon, jos huomioidaan ympäristökorvauksen asettamat typpilannoitusrajat. Funktiomuodosta ja eri vuosien typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteesta riippuen katetuotto oli 0-68 €/ha alhaisempi ympäristökorvauksen 140 kg/ha typpilannoitus rajoitteella ja 0-112 €/ha alhaisempi ympäristökorvauksen 120 kg/ha typpilannoitus rajoitteella. LRP-mallin taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso jäi jokaisena tarkastelu vuotena molempien ympäristökorvauksen typpilannoitusrajoitteiden alapuolelle. Muissa funktiomuodoissa, riippuen tarkasteluvuodesta, voidaan jäädä ympäristökorvauksen 140 kg/ha lannoitusrajan alle tai ylittää se hieman. Neliöjuurifunktion osalta vuoden 2006 hintasuhteilla, jotka olivat poikkeuksellisen edulliset, taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso ei ole järkevällä tasolla neliöjuurifunktiolla sekä neliöjuurifunktiolla, jossa funktiossa on mukana paikka-dummy-muuttuja. Tulosten perusteella ympäristökorvauksen ehtoihin sitoutumisella ei ole suurta vaikutusta katetuottoon.

Tutkimuksessa selvitettiin myös, mikä on taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso, jos otetaan huomioon myös typpilannoituksen vaikutus sokeripitoisuuteen. Funktiomuotoina typpilannoituksen vaikutuksesta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen käytettiin lineaari-, kvadraatti- ja neliöjuurifunktiota. Estimointi tehtiin kahdessa osassa, ensin estimoitiin funktiomuoto typpilannoituksen vaikutuksesta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen typpiporraskokeiden aineiston yli ilman dummy-muuttujia ja toisessa vaiheessa tutkittiin dummy-muuttujien vaikutusta. Dummy-muuttujina käytettiin samoja muuttujia kuin estimoidessa typpilannoituksen vaikutusta juurisatoon. Parhaiten typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan sokeripitoisuuteen kuvasi ilman dummy-muuttujia kvadraattifunktio, mutta

selitysaste oli kuitenkin hyvin alhainen, vain 0,027. Lisättäessä mukaan dummy-muuttujat parhaiten typpilannoituksen vaikutusta sokeripitoisuuteen kuvasi neliöjuurifunktio, jossa oli mukana paikka- ja vuosi-dummy-muuttujat, jolloin selitysaste oli 0,81. Typpilannoitustasot eri funktiomuodoilla ovat 0-36 kg/ha alempia kuin taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot ilman sokeripitoisuuden huomioimista. Katetuotto hehtaaria kohti on vastaavasti 206-259 € korkeampi, kun otetaan huomioon myös sokeripitoisuuslisä. Tutkimuksen perusteella sokeripitoisuuden huomioon ottaminen alensi optimaalista lannoitustasoa mutta paransi katetuottoa. Neeteson ja Wadman (1986, 37) omassa tutkimuksessaan ottivat typpilannoituksen vaikutuksen sokeripitoisuuteen huomioon muuntamalla juurisadot vastaamaan sokerijuurikkaan perushinnan 16 % sokeripitoisuuden juurisatoa. Tämä tehtiin käyttäen oletusta, että 16 % poikkeava sokeripitoisuusprosentti vastaisi 8,5 prosenttia 16 % sokeripitoisuuden juurisadon tonnihinnasta. Näin saatiin aikaiseksi oikaistu juurisato käyttäen kaavaa:

$$\text{oikaistu juurisato} = \text{juurisato} + \text{juurisato} * (\text{sokeripitoisuus} - 16) * 0,0085 \quad (5.1)$$

Tässä tutkimuksessa juurisatoa ei muutettu vastaamaan 16 % juurisatoa. Vaan taloudellisesti optimaalinen typpilannoitustaso otettaessa sokeripitoisuus huomioon, laskettiin Excel-taulukkolaskenta ohjelmalla etsimällä typpilannoitustaso, jolla katetuotto on suurin.

Tarkasteltaessa tutkimuksen tuloksia pitää huomioida, että typpilannoituskokeet on tehty koeruutmittakaavassa ja ne poikkeavat siten käytännön viljelystä. Koetulosten keskimääräinen juurisato oli 56,7 tn/ha, sokeriprosentti 17,66 % ja sokerisato 9,96 tn/ha. Sucros Oy:n viljelijöiden viiden vuoden keskisato 2016-2020 oli 38,8 tn/ha ja sokeriprosentti 16,81 % ja sokerisato 6,50 tn/ha. Koepaikoilla kasvuolosuhteet yritetään vakioda, jotta tulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia. Käytännön viljelyssä peltolohkojen väliset erot maalajin, maan ravinnetilan ja vesitalouden suhteen saattavat olla suuriakin, kuten myös käytetyissä lannoitustasoissa. Aineistossa oli mukana koepaikkojen maalaji, multavuus ja ravinnetiedot, mutta niitä ei käytetty tutkimuksessa. Yhtenä jatkotutkimusaiheena voitaisiin olla sisällyttää maalaji mukaan estimointiin ja tarkastella onko maalajilla vaikutusta optimaaliseen lannoitustasoon sokerijuurikkaalla. Esimerkiksi Sumeliuksen (1993, 465-479) tutkimuksessa eri tuotantofunktiolla taloudellisesti optimaalinen typpilannoitustaso vaihteli maalajin perusteella.

Typpiporraskokeiden lannoituksessa oli käytetty vain mineraalilannoitteita. Tutkimusta voitaisiin laajentaa niin, että osa lannoituksesta annettaisiin käyttäen joko kotieläinten lantaa tai orgaanisia lannoitevalmisteita (Sucros Oy lannoitusohjeissa mainitaan, että ”puhdistamolietteestä ja biokaasulaitosten

käsittelyjäännöksestä valmistettuja lannoitevalmisteita (maanparannusaineita tai lannoitteita), joissa on mukana puhdistamolietettä, ei ole sallittua käyttää sokerijuurikkaan lannoitukseen, myöskään luujauhoa ei saa käyttää sokerijuurikkaan viljelykierrossa olevilla lohkoilla”) ja tarkastella mikä vaikutus tällä on taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon. Hlisnikovský ym. (2021,133) tutkimuksessaan vertasivat mineraalilannoitteen, karjanlannan ja näiden yhdistelmän käyttämistä sokerijuurikkaan lannoitukseen. Tutkimuksen tuloksissa ei ollut suurta eroa, kun käytettiin yhdistettyä lannoitusta (karjanlanta ja mineraalilannoitus), verrattuna pelkkään mineraalilannoitukseen. Heidän tutkimuksessaan ei kuitenkaan selvitetty erikseen taloudellisesti optimaalista lannoitustasoa.

Tutkimusaineistossa ei ollut mukana tietoa käytetystä sokerijuurikaslajikkeesta. Olisikin mielenkiintoista laajentaa tutkimusta niin, että estimoinnissa olisi mukana myös eri sokerijuurikaslajikkeet ja tarkastella onko lajikkeiden välillä eroa optimaalisessa lannoitustasossa. Aineiston pitäisi kuitenkin sisältää riittävä määrä havaintoja eri lajikkeista usealta eri vuodelta, jotta estimoinnin tulosta voisi pitää luetettavana.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, mikä tuotantofunktiomuoto parhaiten kuvaisi typpilannoituksen vaikutusta sokerijuurikkaan juurisatoon, ja lisäksi arvioida, mikä vaikutus typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteella on taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon. Tavoitteena oli myös tutkia, mikä vaikutus sokerijuurikkaan sokeripitoisuuden huomioon ottamisella, on taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon ja sokerijuurikkaan katetuottoon. Tutkimusaineisto käsitti 830 sokerijuurikkaan typpilannoitushavaintoa vuosilta 2013-2020.

Tutkimuksen tulosten perusteella sokerijuurikkaan typpilannoituksen satovastetta kuvasi parhaiten BIC-testisuureen perusteella LRP-funktion paikka- ja vuosi-dummy-muuttujalla täydennetty malli, mutta ero kvadraattifunktioon ja Mitscherlich-funktioon vastaavilla dummy-muuttujilla oli hyvin pieni. Neliöjuurifunktioon perustuvissa malleissa osa mallin antamista lannoitussuosituksista oli epärealistisen korkeita ja siten epäluotettavia.

Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso vaihteli tutkimuksen mukaan eri funktiomuotojen antamien tulosten perusteella 88-157 kg/ha välillä. Kun otettiin huomioon myös typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhte vuosina 2006, 2010, 2014 ja 2019 taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso eri funktiomuodoilla vaihteli välillä 84-230 kg/ha. Vuonna 2006 eri funktiomuotojen välillä erot optimeissa olivat suurimmat. Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso eri funktiomuodoilla, kun otettiin huomioon myös typpilannoituksen vaikutus sokeripitoisuuteen, vaihteli välillä 75-130 kg/ha. LRP-mallissa on vain kaksi suositeltavaa lannoitustasoa. Nämä ovat 0 kg/ha tai eri LRP-muodoille tässä estimoidut lannoitustasot. Mikäli LRP-mallissa rajakustannus olisi rajatuottoa isompi, typpilannoitusta ei kannattaisi tehdä. Tällä perusteella tarkastelu vuosien typpilannoitteen ja sokerijuurikkaan hintasuhteilla, lannoitus oli kannattavaa jokaisena tarkasteluvuotena.

Tutkimuksessa selvitettiin myös, mikä vaikutus sokerijuurikkaan sokeripitoisuudella on taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon. Tulosten perusteella sokeripitoisuuden huomioon ottaminen alensi lannoitustasoja 0-36 kg/ha ja sadosta saatava katetuotto kasvoi 206-259 €.

Lähteet

- Asteriou, D. & Hall, S.G. (2016). Applied Econometrics. Third Edition. Palgrave Macmillan Education.
- Barker, A. V. & Pilbeam D. J. (2007). Handbook of Plant Nutrition. CRC Press LLC. Boca Raton.
- Barkley, A. & Barkley, P. W. (2013). Principles of Agricultural Economics. Routledge. Oxon.
- Cerrato, M.E. & Blackmer A.M. (1990). Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. Agronomy Journal 82, 138–143.
- Debertin D. L. (2012a). Applied Microeconomics. Consumption, Production and Markets. Second edition.
- Debertin D.L. (2012b). Agricultural Production Economics. Second edition.
- Draycott, A. P. & Christenson, D. R. (2003). Nitrogen, Nutrients for Sugar Beet Production. Soil-plant relationships. First edition. CABI.
- Doll, J.P. & Orazem, F. (1984). Production Economics. Theory with Applications. Second edition. New York. Wiley
- Erjala, M. (1999a). Lannoitus. Juurikassarka 2/1999. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.
- Erjala, M., Kaila, T., Raininko, K., Suominen, P. (1999b). Aumaus. Juurikassarka 2/1999. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.
- Eronen, L. (1999). Sokerijuurikkaan tasapainoinen kasvinsuojelu. Juurikassarka 2/1999. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.
- Fabozzi, F.J., Focardi, S.M., Rachev, S.T., Arshanapalli, B.G. (2014). The Basics of Financial Econometrics. John Wiley & Sons. Hoboken
- Fagerstedt, K., Lindén, L., Santanen, A., Väinölä, A. (2016). Kasvioppi - Siemenestä satoon. 1.–3. painos. Edita Publishing Oy. Keuruu

Haneklaus, S., Kohrs, K., Schmidt, G., Schnug, E. (1997). Influence of nitrogen fertilisation on yield and quality of sugar beets. Proc. 11th World Fertilizer Congress - "Fertilization for Sustainable Plant Production and Soil Fertility". Vol. 1. 203-207

https://www.researchgate.net/publication/282610126_Influence_of_nitrogen_fertilization_on_yield_and_quality_of_sugar_beets

Hlisnikovský, L., Menšík, L., Krížová, K., Kunzová, E. (2021). The effect of farmyard manure and mineral fertilizers on sugar beet beetroot and top yield and soil chemical parameters. *Agronomy* 2021, 11, 133

<https://doi.org/10.3390/agronomy11010133>

Hoikkala, P. (1999a). Kylvö. Juurikassarka 2/1999. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.

Hoikkala, P. (1999b). Sokerijuurikkaan korjuu. Juurikassarka 2/1999. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.

Jaggard, K. W., Qi, A., Armstrong, M. J. (2009). A meta-analysis of sugarbeet yield responses to nitrogen fertilizer measured in England since 1980. *Journal of Agricultural Science* (2009) 147. Cambridge University Press. Cambridge. UK. 287–301

Jensen, L.S. & Schjoerring, J.K. (2011). Benefits of nitrogen for food, fiber and industrial production. In: Sutton; Sutton, M.A. et al. *The European Nitrogen Assessment. Sources. Effects and Policy Perspectives*. Cambridge University Press. Cambridge. UK. 32–61.

Juntti, L., (2003). Typpilannoituksen ja kasvinsuojeluaineiden käytön vaikutus mallas- ja rehuohranviljelyn taloudelliseen tulokseen. MTT:n selvityksiä 40. MTT Taloustutkimus. Helsinki
<https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/440880/mtts40.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Jurkola, J., (2019). Tuotantofunktion sekä panos- ja tuotoshintojen vaikutus taloudellisesti optimaaliseen mallasohran typpilannoitukseen. Maisterintutkielma

[Tuotantofunktion sekä panos- ja tuotoshintojen vaikutus taloudellisesti optimaaliseen mallasohran typpilannoitukseen \(helsinki.fi\)](https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/440880/mtts40.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Kaukoranta, T., Hakala, K. (2008). Impact of spring warming on sowing times of cereal, potato and sugar beet in Finland. *Agricultural and Food Science* Vol. 17 (2008): 165–176

Kennedy, P. (2008). *A guide to econometrics*. Sixth edition. Blackwell Publishing.

Kässi, P. (2009). Johdantoa tuotantoekonomian peruskäsitteisiin

https://www.mv.helsinki.fi/home/jsumeliu/MAL5/mal5_pellervo_kassi.pdf

Liesivaara, P., Huan-Niemi, E., Tauriainen, J., Buyesse, J. (2011). Suomen sokerituotannon tulevaisuus EU:n sokeripolitiikassa. MTT raportti 26. Jokioinen: MTT

<https://jukuri.luke.fi/handle/10024/438228>

Monteith, J.L. (1978). Reassessment of maximum growth rates for C3 and C4 crops. *Experimental Agriculture* 14. 1–5.

MTK. (2018). Perunan ja sokerijuurikkaan tuotanto. viitattu 04.12.2018.

<https://www.mtk.fi/-/muu-kasvituotanto-1>

Muurinen, S. (2016a). Maan typpivarat. Juurikassarka 2/2016. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.

Muurinen, S. (2016b). Typpitase juurikkaalla. Juurikassarka 2/2016. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.

Muurinen, S. (2016c). Typen käytön tehokkuus juurikkaalla. Juurikassarka 2/2016. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.

Muurinen, S., (2017). Käytä ympäristökorvausjärjestelmän maksimit hyödyksi typpilannoituksessa. Juurikassarka 1/2017. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.

Märländer, B. (1990). Influence of nitrogen supply on yield and quality of sugar beet. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* volume 153. issue 5: 327–332

Neeteson, J. J. & Wadman, W. P. (1987). Assessment of economically optimum application rates of fertilizer N on the basis of response curves. Fertilizer Research 12. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht. s.37–52

Neilimo, K., Uusi-Rauva, E. (2017). Johdon laskentatoimi. 6.–13. painos. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy

Nummenmaa, L., Holopainen, M., Pulkkinen, P. (2018). Tilastollisten menetelmien perusteet. 1.–4. painos. Sanoma pro Oy. Helsinki

Raininko, K. (2003). Sokerijuurikkaan tutkimus ja viljely Suomessa. ISBN 952-91-6128-X. Tammisaari. Ekenäs: Tryckeri Ab.

Raininko, K. (1999). Sokerijuurikkaan tekninen laatu. Juurikassarka 2/1999. Sokerijuurikkaan Viljelyopas. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus.

Rasmussen, S. (2012). Production Economics. Second edition. Springer. Berlin Heidelberg

Ruokavirasto. (2020). Tuenhakijan perusopas 2020

<https://www.ruokavirasto.fi/tietoa-meista/asiointi/opaat-ja-lomakkeet/viljelijat/hakuoppaat/>

Ruokavirasto. (2020). Ympäristökorvauksen sitoumusehdot 2020

<https://www.ruokavirasto.fi/viljelijat/opaat/sitoumus-ja-sopimusehdot/ymparistokorvauksen-sitoumusehdot/ymparistokorvauksen-sitoumusehdot-2020/#id-48-lannoitus>

Ryhänen, M. 1996, Maatalousyrittäjän päätöksenteko. Maatalousyrittäjien sopeutuminen EU:ssa vallitseviin hintasuhteisiin. Teoksessa: Ylätaalo, M. (toim.) Tuotanto- ja kustannusteoreettinen tarkastelu kasvinviljelyyn ja kotieläintuotantoon sovellettuna. Helsingin yliopiston taloustieteen laitoksen julkaisuja 12, s.9–23

Ryhänen, M., Sipiläinen, T. (2018). Maatalousyrityksen johtaminen ja toiminnan kehittäminen. 2. tarkistettu painos. Helsinki: Tempest Oy

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/228594/OPPIKIRJA_Ryhänen%26Sipiläinen.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Sayili, M. & Akca, H. (2004). Comparison of different models for describing sugarbeet yield response to nitrogen fertilizer (Case study of Turkey). Asian Journal of Plant Sciences 3 (4): 529-531

Schabengenger, O., Pierce, F. J. (2002). Contemporary statistical models for the plant and soil sciences. CRC Press LLC. Boca Raton

Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. Annals of Statistics Vol. 6, No.2, 461–464.

Scott, R.K. & Jaggard, K.W. (1993). Crop physiology and agronomy. In: Cooke, D.A., and Scott, R.K. (eds) The Sugar Beet Crop. Chapman & Hall. London, pp. 179–237.

Seppänen, M., Mäkelä, P., Yli-Halla, M., Helenius, J., Kallela, M., Stoddard, F., Teeri, T. (2012). Peltokasvien tuotanto. 2. tarkistettu painos. Opetushallitus: Juvenes Print Oy

Sucros Oy MTK/SLC. (2017). Toimialasopimus 2017/18–2019/20

https://www.sucros.fi/cps/rde/xbcr/SID-17D0BB4F-13DFE0C1/agriportal/Toimialasopimus%202017%20-%202019_4905887_snapshot.pdf

Sucros Oy. Viljelijä. (2017). Toimitussopimus 2017/18–2019/20

https://www.sucros.fi/cps/rde/xbcr/SID-17D0BB4F-13DFE0C1/agriportal/Toimitusopimus%202017-2019_6965076_snapshot.pdf

Sumelius, J. (1993). A Response analysis of wheat and barley to nitrogen in Finland. Agricultural science in Finland. No 3, s.465–480.

Tanner, T. (2017). Sokerijuurikkaan viljely kannattaa. Juurikassarka 1/2017. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus

Turakainen, M. (2009). Sokerijuurikkaan ravinteet – typpi. Juurikassarka 2/2009. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus

Turakainen, M. (2016). Ohjeet kesän 2016 juurikkaan kasvinsuojeluun. Juurikassarka 1/2016. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus

Turakainen, M., Laine, J. (2017). Rikkakasvit ottavat runsaasti ravinteita juurikasmaasta. Juurikassarka 2/2017. Sokerijuurikkaan Tutkimuskeskus

Yara. Sokerijuurikkaan ravinteiden tarve.

<https://www.yara.fi/lannoitus/sokerijuurikas/sokerijuurikkaan-ravinteiden-tarve/>

Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta 1250/2014. Helsinki. Maa- ja metsätalousministeriö 18.12.2014.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141250>

Verbeek, M. (2017). A Guide to Modern Econometrics. Fifth Edition. John Wiley & Sons Ltd.

Watson, D.J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops. Parts I and II. Annals of Botany 11. 41–76. 375–407.

Watson, D.J. (1952). Physiological basis of variation in yield. Advances in Agronomy 4. 101–145.

Liite 1. Typpiporraskoe aineistosta tehtyjen estimointien tulokset

Taulukko 1. Kvadraattifunktioon perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

```
##
## Call:
## lm(formula = Y ~ N + N2, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -37803  -9159   -493    6930   55125
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 46500.3145  1249.3994  37.218 < 2e-16 ***
## N            131.6561    23.0928   5.701 1.66e-08 ***
## N2           -0.2969     0.1072  -2.771 0.00572 **
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 14980 on 827 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.09484,    Adjusted R-squared:  0.09265
## F-statistic: 43.33 on 2 and 827 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Taulukko 2. Neliöjuurifunktioon perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

```
##
## Call:
## lm(formula = Y ~ Nsqrt + N, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -38077  -9205   -488    6795   55372
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 46253.34    1263.37  36.611 < 2e-16 ***
## Nsqrt       1250.38     413.08   3.027 0.00255 **
## N           -15.61      29.95  -0.521 0.60242
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 14960 on 827 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.09645,    Adjusted R-squared:  0.09427
## F-statistic: 44.14 on 2 and 827 DF,  p-value: < 2.2e-16
```


Taulukko 3. Toisen asteen termi lisätty neliöjuurifunktioon ja siihen perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

```
##
## Call:
## lm(formula = Y ~ Nsqrt + N2 + N, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -38727  -9184   -310    7026   55413
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 46212.1532  1264.9124   36.534  <2e-16 ***
## Nsqrt       2550.3849  1790.8464    1.424   0.155
## N2           0.3463     0.4642    0.746   0.456
## N          -176.3067    217.4754   -0.811   0.418
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 14970 on 826 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.09706,    Adjusted R-squared:  0.09378
## F-statistic: 29.6 on 3 and 826 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Taulukko 4. LRP-malliin perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

```
##
## Formula: Y ~ linplat(Nitro, a, b, clx)
##
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a   46210.28   1267.28   36.464  < 2e-16 ***
## b     119.24     21.23    5.617 2.65e-08 ***
## clx   108.76     15.56    6.990 5.67e-12 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 14990 on 827 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 3
## Achieved convergence tolerance: 4.391e-12
```

Taulukko 5. QRP-malliin perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

```
##
## Formula: Y ~ quadplat(Nitro, a, b, clx)
##
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a   47093.23    1687.28  27.911 < 2e-16 ***
## b     123.68      27.38   4.516 7.30e-06 ***
## clx   227.40      51.80   4.390 1.29e-05 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 14480 on 757 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 6
## Achieved convergence tolerance: 3.931e-09
```

Taulukko 6. Mitscherlich-funktioon perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

```
##
## Formula: Y ~ expon(Nitro, a, b, c)
##
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a   6.247e+04  2.859e+03  21.854 < 2e-16 ***
## b  -1.600e+04  3.023e+03  -5.294 1.54e-07 ***
## c   1.104e-02  4.820e-03   2.290  0.0223 *
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 14970 on 827 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 9
## Achieved convergence tolerance: 1.49e-08
```

Liite 2. Estimointien tulokset dummy-muuttujilla

Taulukko 7. Kvadraattifunktion estimaatti paikka- ja vuosi-dummy -muuttujalla.

```
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -37874  -5142    682   6374  28797
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  4.908e+04  1.690e+03  29.042 < 2e-16 ***
## N            1.771e+02  1.702e+01  10.404 < 2e-16 ***
## N2           -5.170e-01  7.152e-02  -7.228 1.22e-12 ***
## D2014        -1.377e+03  1.473e+03  -0.934 0.350430
## D2015        -3.315e+03  1.378e+03  -2.406 0.016361 *
## D2016        -5.815e+03  1.516e+03  -3.836 0.000135 ***
## D2017        -3.366e+03  1.516e+03  -2.221 0.026660 *
## D2018         5.128e+03  2.037e+03   2.518 0.012006 *
## D2019         3.522e+04  2.037e+03  17.294 < 2e-16 ***
## D2020        -8.540e+03  1.283e+03  -6.653 5.54e-11 ***
## DTP1         -1.651e+04  1.363e+03 -12.113 < 2e-16 ***
## DTP2         -1.966e+03  1.186e+03  -1.658 0.097695 .
## DTP3          5.908e+03  1.079e+03   5.477 5.91e-08 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8853 on 747 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.6543, Adjusted R-squared:  0.6487
## F-statistic: 117.8 on 12 and 747 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Taulukko 8. Kvadraattifunktion estimaatti paikka-, vuosi- ja jaettu lannoitus -dummy -muuttujalla.

```
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -37765  -5073    639   6376  29112
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  4.911e+04  1.689e+03  29.083 < 2e-16 ***
## N            1.670e+02  1.827e+01   9.144 < 2e-16 ***
## N2           -4.709e-01  7.769e-02  -6.061 2.15e-09 ***
## D2014        -1.176e+03  1.478e+03  -0.795 0.426581
## D2015        -3.187e+03  1.379e+03  -2.311 0.021118 *
## D2016        -5.920e+03  1.516e+03  -3.905 0.000103 ***
## D2017        -3.471e+03  1.516e+03  -2.289 0.022329 *
## D2018         5.410e+03  2.043e+03   2.648 0.008274 **
## D2019         3.550e+04  2.043e+03  17.375 < 2e-16 ***
## D2020        -8.812e+03  1.295e+03  -6.805 2.08e-11 ***
## DTP1         -1.663e+04  1.364e+03 -12.189 < 2e-16 ***
## DTP2         -2.012e+03  1.185e+03  -1.697 0.090048 .
## DTP3          5.943e+03  1.078e+03   5.513 4.87e-08 ***
## DJ            1.209e+03  7.997e+02   1.512 0.130892
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8845 on 746 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.6553, Adjusted R-squared:  0.6493
## F-statistic: 109.1 on 13 and 746 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Taulukko 9. Neliöjuurifunktion estimaatti paikka- ja vuosi-dummy -muuttujalla.

```
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -38620  -5209    654    6317   29455
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  48851.32    1708.97   28.585 < 2e-16 ***
## N            -64.38      18.62   -3.458 0.000574 ***
## Nsqrt        1967.84    277.16    7.100 2.91e-12 ***
## D2014        -1419.93   1474.87   -0.963 0.335986
## D2015        -3353.04   1379.45   -2.431 0.015304 *
## D2016        -5804.00   1517.49   -3.825 0.000142 ***
## D2017        -3355.28   1517.49   -2.211 0.027333 *
## D2018         5093.35   2038.67    2.498 0.012690 *
## D2019        35184.98   2038.67   17.259 < 2e-16 ***
## D2020        -8153.69   1282.29   -6.359 3.54e-10 ***
## DTP1         -16510.13   1364.60  -12.099 < 2e-16 ***
## DTP2         -1966.46   1187.25   -1.656 0.098079 .
## DTP3          5908.04   1079.94    5.471 6.12e-08 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8863 on 747 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.6535, Adjusted R-squared:  0.6479
## F-statistic: 117.4 on 12 and 747 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Taulukko 10. Neliöjuurifunktion estimaatti paikka-, vuosi- ja jaettu lannoitus -dummy-muuttujalla.

```
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -38510  -5097    765    6155   29746
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  48878.66    1706.61   28.641 < 2e-16 ***
## N            -51.93      19.88   -2.612 0.009173 **
## Nsqrt        1777.43    297.00    5.985 3.37e-09 ***
## D2014        -1180.71   1478.99   -0.798 0.424937
## D2015        -3201.64   1380.16   -2.320 0.020623 *
## D2016        -5925.44   1516.89   -3.906 0.000102 ***
## D2017        -3476.72   1516.89   -2.292 0.022183 *
## D2018         5427.37   2044.54    2.655 0.008110 **
## D2019        35519.00   2044.54   17.373 < 2e-16 ***
## D2020        -8508.93   1296.16   -6.565 9.76e-11 ***
## DTP1        -16643.29   1364.75  -12.195 < 2e-16 ***
## DTP2        -2018.77   1185.94   -1.702 0.089125 .
## DTP3         5948.46   1078.65    5.515 4.82e-08 ***
## DJ           1395.76    789.88    1.767 0.077630 .
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8850 on 746 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.6549, Adjusted R-squared:  0.6489
## F-statistic: 108.9 on 13 and 746 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Taulukko 11. LRP-mallin estimaatti paikka- ja vuosi-dummy -muuttujalla.

```
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a      48999.755    1693.860   28.928 < 2e-16 ***
## b       126.825     11.791   10.756 < 2e-16 ***
## clx     115.488      6.448   17.912 < 2e-16 ***
## TY2    -1452.748    1469.070  -0.989 0.323037
## TY3    -3393.004    1375.108  -2.467 0.013831 *
## TY4    -5774.906    1512.709  -3.818 0.000146 ***
## TY5    -3326.188    1512.709  -2.199 0.028196 *
## TY6     5133.281    2030.164   2.529 0.011660 *
## TY7    35224.909    2030.164  17.351 < 2e-16 ***
## TY8    -8485.990    1291.681  -6.570 9.45e-11 ***
## TP1   -16510.132    1360.375 -12.136 < 2e-16 ***
## TP2    -1966.462    1183.580  -1.661 0.097042 .
## TP3     5908.036    1076.595   5.488 5.58e-08 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8836 on 747 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 4
## Achieved convergence tolerance: 3.344e-08
```

Taulukko 12. LRP-mallin estimaatti paikka-, vuosi- ja jaettu lannoitus-dummy -muuttujalla.

```
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a      48988.955    1692.615   28.943 < 2e-16 ***
## b       122.956     12.079   10.179 < 2e-16 ***
## clx     116.532      6.743   17.282 < 2e-16 ***
## TY2    -1233.198    1475.723  -0.836 0.403616
## TY3    -3280.128    1376.275  -2.383 0.017406 *
## TY4    -5863.457    1512.809  -3.876 0.000116 ***
## TY5    -3414.739    1512.810  -2.257 0.024283 *
## TY6     5436.641    2039.355   2.666 0.007845 **
## TY7    35528.269    2039.355  17.421 < 2e-16 ***
## TY8    -8790.574    1307.611  -6.723 3.55e-11 ***
## TP1   -16614.531    1361.258 -12.205 < 2e-16 ***
## TP2    -2007.475    1183.035  -1.697 0.090135 .
## TP3     5939.729    1076.014   5.520 4.68e-08 ***
## TL1    1094.333      752.710   1.454 0.146406
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8829 on 746 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 3
## Achieved convergence tolerance: 6.127e-06
```

Taulukko 13. QRP-mallin estimaatti paikka- ja vuosi-dummy -muuttujalla.

```
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a    48853.82   1705.50  28.645 < 2e-16 ***
## b      193.79    25.87   7.491 1.94e-13 ***
## clx   152.52    18.24   8.360 3.07e-16 ***
## TY2  -1389.55   1471.01  -0.945 0.345154
## TY3  -3340.99   1376.88  -2.426 0.015481 *
## TY4  -5783.95   1514.48  -3.819 0.000145 ***
## TY5  -3335.24   1514.48  -2.202 0.027954 *
## TY6   5138.74   2033.55   2.527 0.011710 *
## TY7  35230.37   2033.55  17.325 < 2e-16 ***
## TY8  -8410.53   1283.39  -6.553 1.05e-10 ***
## TP1 -16510.13   1361.79 -12.124 < 2e-16 ***
## TP2  -1966.46   1184.81  -1.660 0.097390 .
## TP3   5908.04   1077.72   5.482 5.76e-08 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8845 on 747 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 11
## Achieved convergence tolerance: 5.514e-06
```

Taulukko 14. QRP-mallin estimaatti paikka-, vuosi- ja jaettu lannoitus-dummy -muuttujalla.

```
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a    48869.38   1703.53  28.687 < 2e-16 ***
## b      183.63    25.83   7.110 2.71e-12 ***
## clx   157.72    19.46   8.104 2.18e-15 ***
## TY2  -1173.56   1476.74  -0.795 0.427042
## TY3  -3215.35   1378.32  -2.333 0.019923 *
## TY4  -5884.86   1514.98  -3.884 0.000112 ***
## TY5  -3436.14   1514.98  -2.268 0.023608 *
## TY6   5441.12   2041.58   2.665 0.007862 **
## TY7  35532.75   2041.58  17.405 < 2e-16 ***
## TY8  -8723.81   1297.96  -6.721 3.58e-11 ***
## TP1 -16620.17   1362.64 -12.197 < 2e-16 ***
## TP2  -2009.69   1184.17  -1.697 0.090088 .
## TP3   5941.44   1077.04   5.516 4.77e-08 ***
## TL1  1153.40    773.67   1.491 0.136430
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8837 on 746 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 6
## Achieved convergence tolerance: 5.359e-06
```

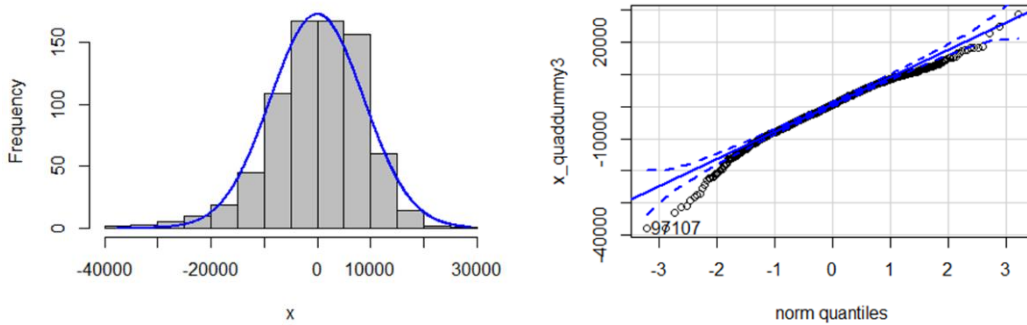
Taulukko 15. Mitscherlich-funktion estimaatti paikka- ja vuosi-dummy -muuttujalla.

```
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a    6.428e+04  1.614e+03  39.822 < 2e-16 ***
## b    2.392e-01  1.963e-02  12.186 < 2e-16 ***
## c    1.891e-02  4.813e-03   3.930 9.30e-05 ***
## TY2 -1.435e+03  1.474e+03  -0.974 0.33042
## TY3 -3.348e+03  1.379e+03  -2.428 0.01543 *
## TY4 -5.806e+03  1.517e+03  -3.828 0.00014 ***
## TY5 -3.357e+03  1.517e+03  -2.214 0.02716 *
## TY6  5.068e+03  2.037e+03   2.488 0.01307 *
## TY7  3.516e+04  2.037e+03  17.259 < 2e-16 ***
## TY8 -8.199e+03  1.282e+03  -6.394 2.85e-10 ***
## TP1 -1.651e+04  1.364e+03 -12.105 < 2e-16 ***
## TP2 -1.966e+03  1.187e+03  -1.657 0.09792 .
## TP3  5.908e+03  1.079e+03   5.473 6.03e-08 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8859 on 747 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 8
## Achieved convergence tolerance: 1.49e-08
```

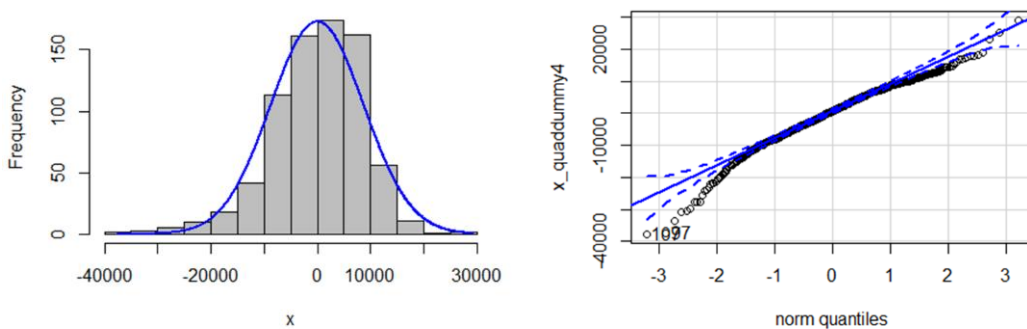
Taulukko 16. Mitscherlich-funktion estimaatti paikka-, vuosi- ja jaettu lannoitus-dummy -muuttujalla.

```
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a    6.420e+04  1.680e+03  38.208 < 2e-16 ***
## b    2.381e-01  2.016e-02  11.812 < 2e-16 ***
## c    1.683e-02  4.389e-03   3.834 0.000137 ***
## TY2 -1.185e+03  1.478e+03  -0.802 0.423071
## TY3 -3.197e+03  1.379e+03  -2.318 0.020737 *
## TY4 -5.925e+03  1.516e+03  -3.908 0.000101 ***
## TY5 -3.476e+03  1.516e+03  -2.293 0.022127 *
## TY6  5.420e+03  2.043e+03   2.652 0.008160 **
## TY7  3.551e+04  2.043e+03  17.378 < 2e-16 ***
## TY8 -8.576e+03  1.298e+03  -6.609 7.35e-11 ***
## TP1 -1.664e+04  1.364e+03 -12.202 < 2e-16 ***
## TP2 -2.018e+03  1.185e+03  -1.703 0.088993 .
## TP3  5.948e+03  1.078e+03   5.518 4.74e-08 ***
## TL1  1.388e+03  7.794e+02   1.781 0.075262 .
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 8846 on 746 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 7
## Achieved convergence tolerance: 1.49e-08
```

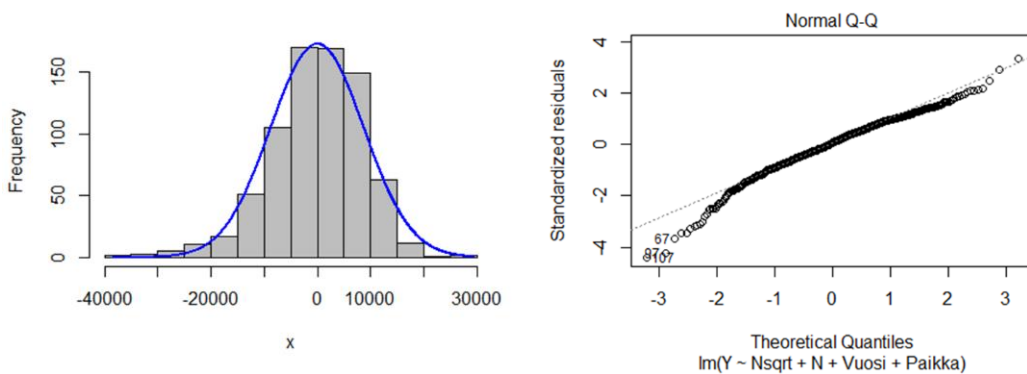
Liite 3. Estimoitujen mallien residuaalien histogrammit ja niiden suhde normaalijakautumaan.



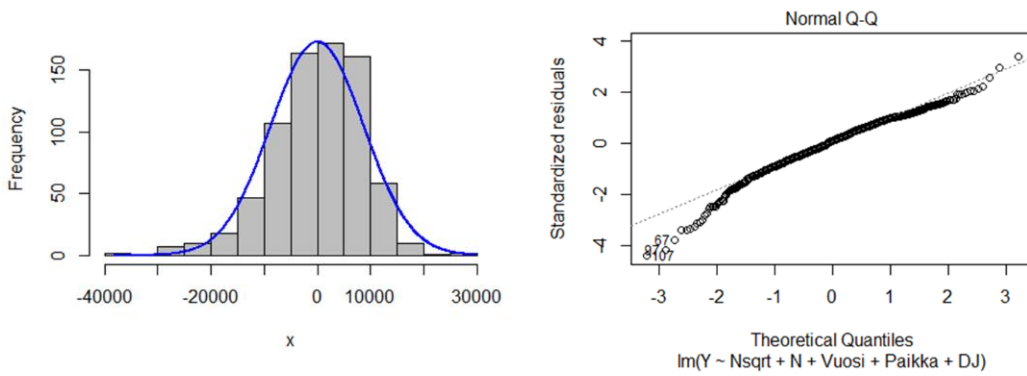
kvadraattifunktio vuosi ja paikka dummy-muuttujat



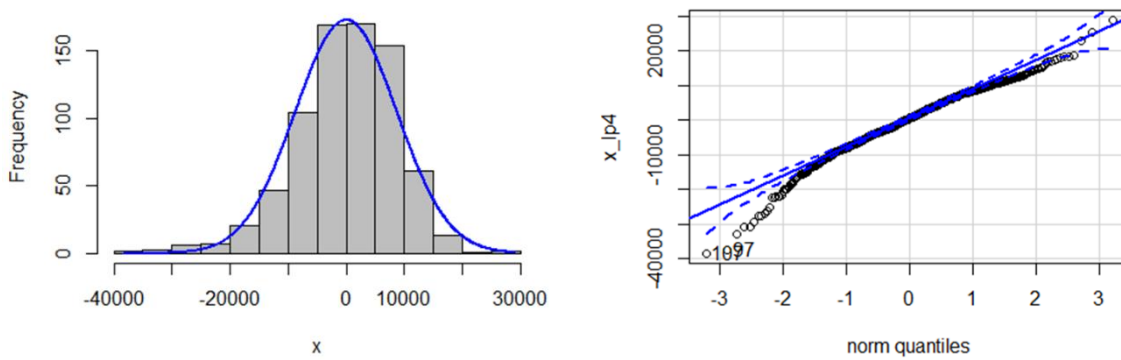
kvadraattifunktio vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttujat



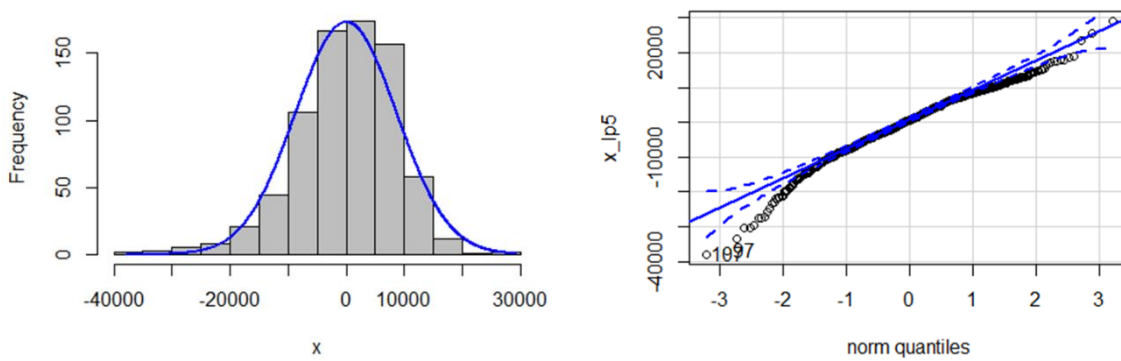
Neliöjuurifunktio vuosi ja paikka dummy-muuttujat



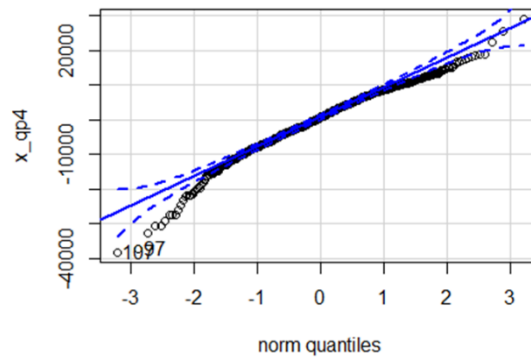
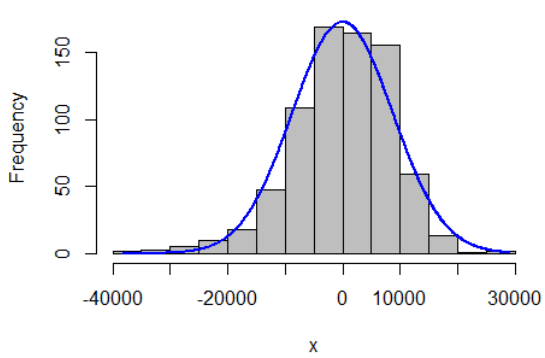
Neliöjuurifunktio vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttujat



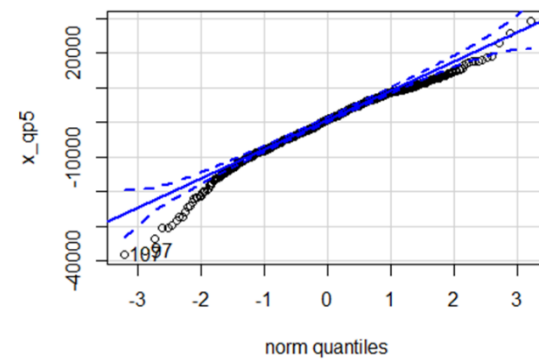
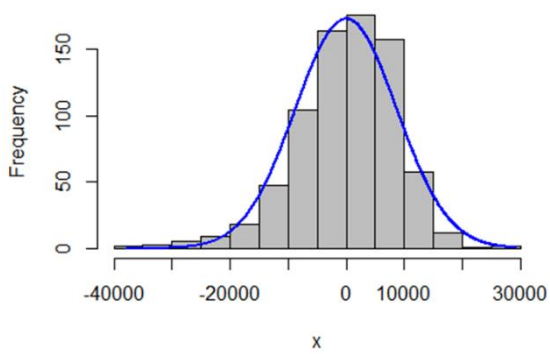
LRP-malli vuosi ja paikka dummy-muuttujat



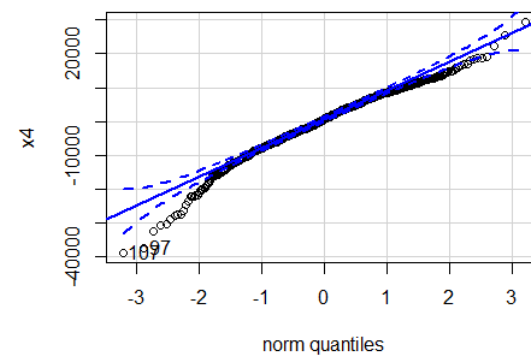
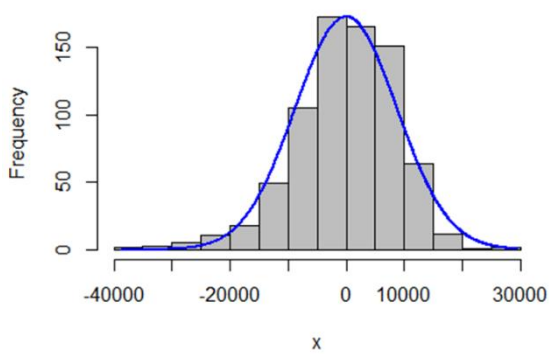
LRP-malli vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttujat



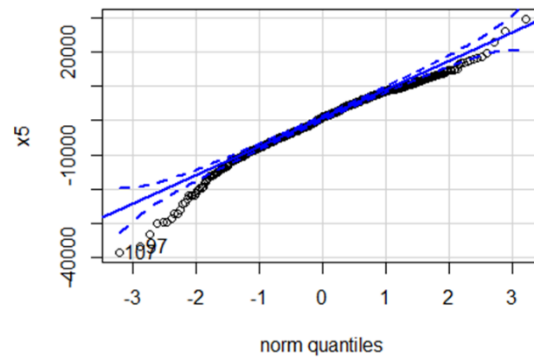
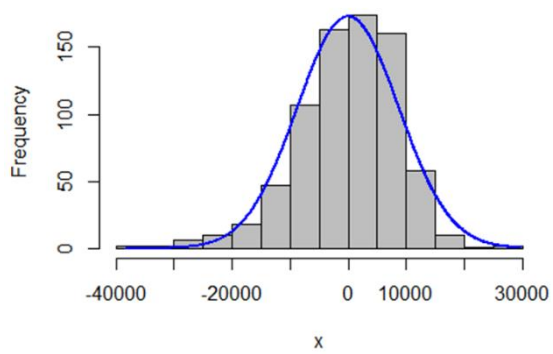
QRP-malli vuosi ja paikka dummy-muuttujat



QRP-malli vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttujat



Mitscherlich-funktio vuosi ja paikka dummy-muuttujat



Mitscherlich-funktio vuosi, paikka ja jaettu lannoitus dummy-muuttujat

Liite 4. Estimoidut mallit typpilannoituksen vaikutuksesta sokeripitoisuuteen.

```
## Call:
## lm(formula = SP ~ N, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.4705 -1.0111 -0.2218  0.7767  3.2195
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 18.0329204  0.1170616 154.046 < 2e-16 ***
## N           -0.0028741  0.0008308  -3.459 0.000572 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.28 on 758 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.01554,    Adjusted R-squared:  0.01424
## F-statistic: 11.97 on 1 and 758 DF,  p-value: 0.0005718
```

```
## Call:
## lm(formula = SP ~ N + N2, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.5495 -0.9998 -0.2495  0.7305  3.3093
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 1.776e+01  1.483e-01 119.734 < 2e-16 ***
## N           3.826e-03  2.407e-03   1.589  0.11244
## N2          -2.994e-05  1.010e-05  -2.963  0.00314 **
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.273 on 757 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.02683,    Adjusted R-squared:  0.02426
## F-statistic: 10.43 on 2 and 757 DF,  p-value: 3.385e-05
```

```
## Call:
## lm(formula = SP ~ Nsqrt + N, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.5172 -0.9999 -0.2453  0.7253  3.3137
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 17.756263  0.151964 116.845 < 2e-16 ***
## Nsqrt       0.111907  0.039458   2.836  0.00469 **
## N           -0.010023  0.002653  -3.778  0.00017 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.274 on 757 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.02589,    Adjusted R-squared:  0.02332
## F-statistic: 10.06 on 2 and 757 DF,  p-value: 4.872e-05
```

Liite 5. Estimoidut mallit typpilannoituksen vaikutuksesta sokeripitoisuuteen, kun mukana on vuosi- ja paikka-dummy-muuttujat.

```
## Call:
## lm(formula = SP ~ N + Vuosi + Paikka, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.04864 -0.35793  0.01521  0.36259  2.38528
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  17.9564269  0.1000723  179.435 < 2e-16 ***
## N            -0.0028274  0.0003694   -7.655 5.97e-14 ***
## D2014        -1.9504945  0.0944789  -20.645 < 2e-16 ***
## D2015        -0.9576076  0.0884597  -10.825 < 2e-16 ***
## D2016         1.9022156  0.0973111   19.548 < 2e-16 ***
## D2017        -0.9292390  0.0973111   -9.549 < 2e-16 ***
## D2018        -1.1102482  0.1305252   -8.506 < 2e-16 ***
## D2019        -1.5671053  0.1305252  -12.006 < 2e-16 ***
## D2020         0.6255149  0.0821941    7.610 8.25e-14 ***
## DTP1         -0.7862233  0.0761367  -10.326 < 2e-16 ***
## DTP2         1.4434468  0.0875095   16.495 < 2e-16 ***
## DTP3         0.4332559  0.0692546    6.256 6.64e-10 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.5684 on 748 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.8084, Adjusted R-squared:  0.8056
## F-statistic: 286.9 on 11 and 748 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

```
## Call:
## lm(formula = SP ~ N + N2 + Vuosi + Paikka, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.92671 -0.35713  0.00518  0.37036  2.33161
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  1.783e+01  1.079e-01  165.219 < 2e-16 ***
## N            2.108e-04  1.087e-03    0.194  0.84634
## N2          -1.356e-05  4.568e-06   -2.969  0.00308 **
## D2014        -1.937e+00  9.411e-02  -20.579 < 2e-16 ***
## D2015        -9.585e-01  8.800e-02  -10.892 < 2e-16 ***
## D2016         1.904e+00  9.681e-02   19.669 < 2e-16 ***
## D2017        -9.274e-01  9.681e-02   -9.579 < 2e-16 ***
## D2018        -1.088e+00  1.301e-01   -8.363 2.99e-16 ***
## D2019        -1.545e+00  1.301e-01  -11.875 < 2e-16 ***
## D2020         6.082e-01  8.198e-02    7.420 3.20e-13 ***
## DTP1         -7.862e-01  7.574e-02  -10.380 < 2e-16 ***
## DTP2         1.443e+00  8.706e-02   16.581 < 2e-16 ***
## DTP3         4.333e-01  6.890e-02    6.289 5.45e-10 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.5654 on 747 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.8106, Adjusted R-squared:  0.8076
## F-statistic: 266.5 on 12 and 747 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

```
## Call:
## lm(formula = SP ~ Nsqrt + N + Vuosi + Paikka, data = dat)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.91243 -0.36252  0.01253  0.36749  2.30417
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  17.817904   0.108960  163.528 < 2e-16 ***
## Nsqrt        0.055106   0.017671   3.118  0.00189 **
## N           -0.006347   0.001187  -5.348  1.19e-07 ***
## D2014       -1.936871   0.094034 -20.598 < 2e-16 ***
## D2015       -0.959610   0.087951 -10.911 < 2e-16 ***
## D2016        1.904522   0.096751  19.685 < 2e-16 ***
## D2017       -0.926932   0.096751  -9.581 < 2e-16 ***
## D2018       -1.087211   0.129981  -8.364  2.95e-16 ***
## D2019       -1.544068   0.129981 -11.879 < 2e-16 ***
## D2020        0.617861   0.081756   7.557  1.21e-13 ***
## DTP1        -0.786223   0.075697 -10.387 < 2e-16 ***
## DTP2         1.443447   0.087004  16.591 < 2e-16 ***
## DTP3         0.433256   0.068854   6.292  5.32e-10 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.5651 on 747 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.8109, Adjusted R-squared:  0.8078
## F-statistic: 266.9 on 12 and 747 DF, p-value: < 2.2e-16
```